VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

КЛАССИКИ НАУКИ

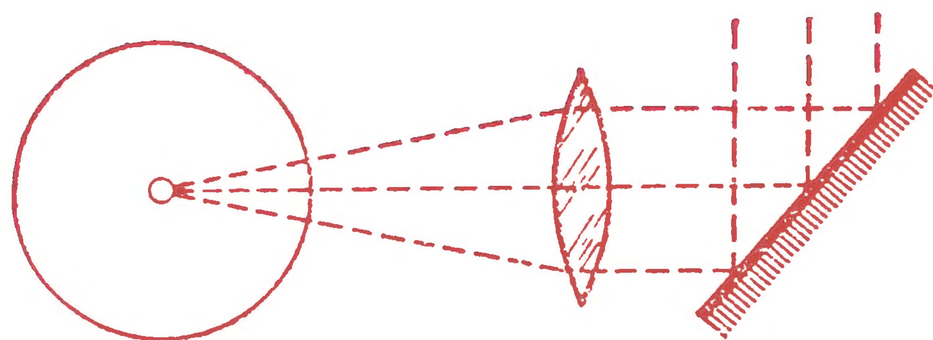


П. Н. ЛЕБЕДЕВ



СОБРАНИЕ СОЧИНЕНИЙ

РЕДАКЦИЯ и ПРИМЕЧАНИЯ
ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА АН СССР
Т. П. КРАВЦА,
ПРОФ. Н. А. КАПЦОВА, ДОЦ. А. А. ЕЛИСЕЕВА
СТАТЬИ
Т. П. КРАВЦА и Н. А. КАПЦОВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
1963

СЕРИЯ «КЛАССИКИ НАУКИ»

основана академиком С. И. Вавиловым

Редакционная коллегия

академик *И. Г. Петровский*, академик *Н. Н. Андреев*, академик *Б. А. Казанский*, академик *П. Ф. Юдин*, член-корр. АН СССР *Б. Н. Делоне*, член-корр. АН СССР *А. М. Самарин*, проф. *Д. М. Лебедев*, проф. *Н. А. Фигуровский*, канд. техн. наук *И. В. Кузнецов*

Комиссия по изданию трудов П. Н. Лебедева:

академик *А. А. Лебедев* (председатель), член-корр. АН СССР *В. К. Аркадьев*, член-корр. АН СССР *Т. П. Кравец*, *Н. А. Капцов*, *А. А. Елисеев*, *А. Ф. Кононков* (секретарь)

Ответственный редактор тома профессор *Н. А. Капцов*


СОБРАНИЕ СОЧИНЕНИЙ
* П.Н. ЛЕБЕДЕВ *

ОТ РЕДАКЦИИ

Сочинения П. Н. Лебедева издавались дважды: в первый раз, в 1913 г.,— Московским физическим обществом им. П. Н. Лебедева, т. е. его ближайшими учениками вскоре после кончины их учителя; второй раз, в сокращенном виде,— А. К. Тимирязевым в 1951 г. Настоящее собрание значительно полнее, чем предыдущие издания; достаточно сказать, что вместо 31 статьи, помещенной в издании 1913 г., здесь печатается 45 статей. Число публикуемых работ увеличилось вследствие того, что оказалось возможным включить в настоящее собрание несколько опущенных в издании 1913 г. авторефератов, предварительных сообщений и обзоров, одноименных, но не совпадающих по содержанию.

Однако и настоящее собрание все же не является полным, так как в него не включен ряд работ П. Н. Лебедева, а именно: курсы лекций, читанных П. Н. Лебедевым студентам-медикам (они издавались трижды: в 1898, 1902 и 1908 гг.); отзывы, рефераты и представления разных лиц к премиям. Исключение сделано для реферата П. Н. Лебедева о работе П. Б. Лейберга: «Экспериментальное исследование коэффициента затухания акустических резонаторов»; это — подробное изложение первой работы, выполненной под руководством П. Н. Лебедева. В собрание не вошли полемические статьи П. Н. Лебедева «По поводу статьи В. С. Щегляева: « О разрядах конденсатора при помощи искры», 1900; две статьи о работах П. Н. Мышкина, 1906 и 1909; заметка «По поводу статьи В. К. Лебединского: «Исследование работы трансформатора переменного тока», 1910. Но ряд статей по вопросу о дисперсии межзвездного пространства, а также статья «Абсолютная величина давления солнечного света на земную атмосферу», 1910, включены в настоящий том, так как они содержат ценное изложение взглядов П. Н. Лебедева на предмет спора.

Отдельно следует поставить вопрос о неизданных трудах П. Н. Лебедева, хранящихся в Архиве АН СССР. Таких работ, находящихся в разной степени готовности, имеется довольно много; наиболее завершенными

являются следующие: 1. «Опытная проверка теории Эдлунда» — первая работа, сделанная П. Н. Лебедевым в бытность его студентом МВТУ в 1887 г. (в лаборатории В. С. Щегляева). Статья и по содержанию и по экспериментальному выполнению ничем не напоминает последующих блестящих трудов П. Н. Лебедева; сам Лебедев никогда не помышлял об ее публикации. 2. Работа о силах давления, развивающихся при движении (в эфире!) излучающего тела. Эта работа теоретического характера была послана в «Анналы», но затем взята П. Н. Лебедевым обратно, и в дальнейшем опубликована не была. 3. Статья о демонстрации капиллярных волн на поверхности жидкости, написанная совместно с И. Ф. Усагиным; работа не вполне закончена (отсутствует чертеж прибора) и не опубликована, по всей вероятности, потому, что такую же задачу П. Н. Лебедев поставил перед своим учеником Е. В. Богословским. Редакция решила в этом вопросе следовать примеру автора [1].

В конце настоящего издания приведены примечания редакции. Ссылки на примечания, даваемые в тексте, помещены в квадратных скобках.

---

[1] Эта статья опубликована А. Р. Сердюковым в УФН за 1953 г. № 3; он снабдил ее чертежом, отсутствующим у Лебедева и восстановленным по прибору, имеющемуся в физической коллекции МГУ.

НАУЧНЫЕ РАБОТЫ



1. ОБ ИЗМЕРЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ ПАРОВ И О ТЕОРИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ МОССОТТИ — КЛАУЗИУСА

ВВЕДЕНИЕ

Относительно диэлектрических постоянных паров пока имеются лишь измерения Клеменчича [1] [1], сделанные по методу, оказавшемуся весьма удобным для низкокипящих веществ.

Цель настоящего опытного исследования — выработать метод, годный для паров высококипящих веществ, и испытать его на определении диэлектрических постоянных некоторых паров. Имелось в виду также отыскать какую-нибудь связь между найденными диэлектрическими постоянными паров и известными уже диэлектрическими постоянными этих же веществ в жидком состоянии. Такая связь вытекает из теории диэлектрической поляризации, выработанной на основании идей Фарадея сначала Моссотти, а потом Клаузиусом. При некоторых предположениях Клаузиус нашел связь между относительным заполнением пространства веществом и диэлектрической постоянной этого последнего. Так как пока еще нет опытной проверки этой теории, то я и пытался ее произвести во второй половине настоящей статьи на основании имеющегося опытного материала.

Опытная часть содержит:

§ 1. Метод измерения.

§ 2. Приборы.

§ 3. Встречающиеся ошибки.

§ 4. Результаты измерений.

§ 5. О возможных изменениях метода.

Теоретическая часть (§ 6) содержит проверку теории Моссотти — Клаузиуса.

---

[1] I. Klemenčič. Wien. Ber., (2) 91, p. 712, 1885; Exner's Rep., 21, p. 571, 885; Beibl., 10, p. 109, 1886.

Позволяю себе выразить здесь мою сердечную благодарность профессору Ф. Кольраушу [2] за помощь и интерес, которые он постоянно уделял моей работе.

§ 1. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Диэлектрические постоянные паров определялись из измерения емкостей, причем сравнивались между собою два приблизительно равных конденсатора, из которых один имел постоянную емкость, а в другом диэлектриком служил то воздух, то испытуемый пар.

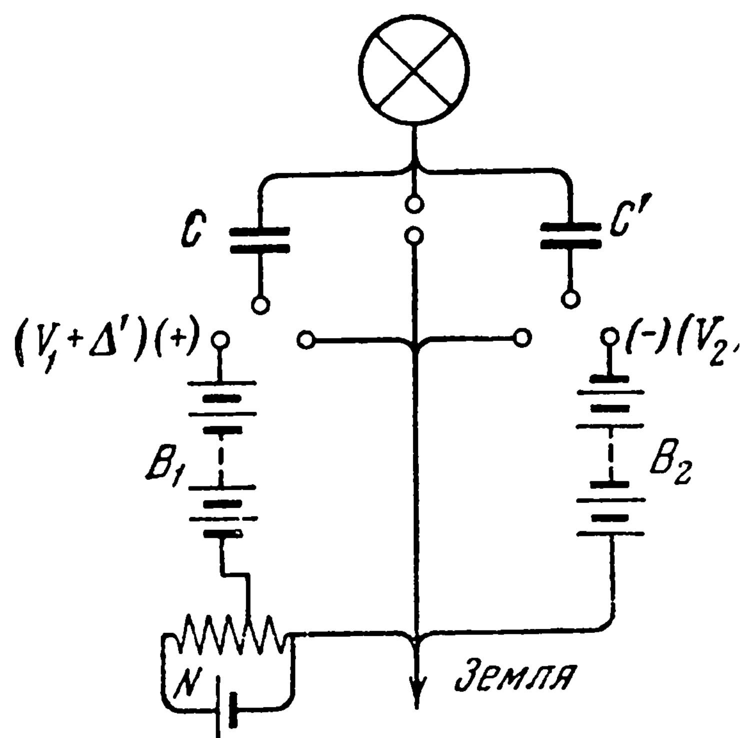


Рис. 1

Обозначим соответственно через C' и C'' емкости второго конденсатора с воздухом и с паром и через K' и K'' соответственные диэлектрические постоянные воздуха и пара; тогда

$$\frac{K''}{K'} = \frac{C''}{C'}\,. \qquad (1)$$

Отношение емкостей конденсаторов определялось по несколько измененной методе Гопкинсона [1] [3].

Определение велось следующим образом (рис. 1).

Внутренние обкладки конденсаторов, постоянно соединенные между собой и с электрометром, отводились к земле, после чего внешние обкладки заряжались соответственно до потенциалов $+(V_1 + \Delta')$ и $-(V_2)$. Здесь V_1 и V_2 обозначают потенциалы двух ветвей батареи B_1 и B_2, а Δ'— ту электродвижущую силу, которая прибавлялась к (+) ветви включением соответствующей части сопротивления, замыкавшего вспомогательный элемент N.

Затем соединение с землей внутренних обкладок прерывалось, и после этого каждая внешняя обкладка отключалась от батареи и соединялась с землей; тогда электрометр, вообще говоря, дает некоторое отклонение.

Если мы подберем Δ' так, чтобы электрометр оставался в покое, то количества электричества, наведенные в обоих конденсаторах (с емкостями C и C'), будут по абсолютной величине одинаковы:

$$C(V_1 + \Delta') - C'V_2 = 0\,;$$
$$\frac{C'}{C} = \frac{V_1 + \Delta'}{V_2}\,. \qquad (2)$$

Из двух наблюденных отклонений электрометра для величин Δ_1' и Δ_2' можно общеизвестным путем найти интерполяцией величину Δ'.

---

[1] Hopkinson. Proc. Roy. Soc., London, **26**, p. 298, 1887; Beibl., **1**, p. 565, 1877.

Так как при измерении диэлектрических постоянных паров дело идет о том, чтобы определить отношение (2) с точностью до одной десятитысячной, а при многочасовой длительности опытов нельзя предполагать необходимого для такой точности постоянства батареи, то для независимости от колебаний ее электродвижущей силы приходилось перемещать ветви батареи одну на место другой, что было легко выполнимо при приблизительном равенстве ветвей и конденсаторов.

Обозначим соответственно через Δ'_+ и Δ'_- прибавляемые к (+) ветви батареи электродвижущие силы, когда постоянный конденсатор C заряжается положительно или соответственно отрицательно; из (2) следует

$$\frac{C'}{C} = \frac{V_1 + \Delta'_+}{V_2} = \frac{V_2}{V_1 + \Delta'_-}; \quad \left(\frac{C'}{C}\right)^2 = \frac{V_1 + \Delta'_+}{V_1 + \Delta'_-}. \tag{3}$$

При каждом наполнении конденсатора следует провести по два отсчета для определения величин Δ'_+ и Δ'_- и один — для определения нулевой точки электрометра. Если мы желаем оградить себя от случайных ошибок установки электрометра, то следует повторить весь ряд наблюдений; так как при сильном колебании комнатной температуры нулевая точка чувствительного электрометра медленно смещается, а отношение ветвей батареи непрерывно изменяется, то целесообразно повторить ряд наблюдений в обратном порядке; если отсчеты делались в равные промежутки времени, то отпадают ошибки, проистекающие от постепенного изменения со временем батарей и электрометра.

При настоящих опытах двухкратное повторение описанного двойного ряда давало 20 отдельных отсчетов, из которых и были вычислены величины Δ'_+ и Δ'_-.

Если переменный конденсатор наполнен воздухом, то его емкость C' определяется из величин C, V_1 и Δ'_+ и Δ'_- по формуле (3); если он наполнен паром, то его емкость C'' определяется из соответствующих величин C, V_1 и Δ''_+ и Δ''_-. Искомое отношение (1) может быть поэтому написано так:

$$\frac{K''}{K'} = \frac{C''}{C'} = +\sqrt{\frac{(V_1 + \Delta''_+)}{(V_1 + \Delta''_-)} \cdot \frac{(V_1 + \Delta'_-)}{(V_1 + \Delta'_+)}}. \tag{4}$$

Приняв во внимание, что в (4) V_1 велико относительно других величин, можно вывести следующее соотношение:

$$K'' = K'\left[1 + \frac{(\Delta''_+ - \Delta''_-) - (\Delta'_+ - \Delta'_-)}{2V_1}\right]. \tag{5}$$

Здесь K' — диэлектрическая постоянная воздуха, отнесенная к пустоте, диэлектрическая постоянная которой принята равной 1; она известна из измерений Больцмана [1] и Клеменчича [2].

Единицей электродвижущей силы служил нормальный элемент батареи; таким образом, потенциал $V_1 = n$, где n обозначает число элементов в ветви батареи.

§ 2. ПРИБОРЫ

1. *Расположение приборов и переключатель-качалка.* Необходимые при измерении емкостей переключения частей цепи обслуживались переключателем в виде качалки, схематически представленном на рис. 2.

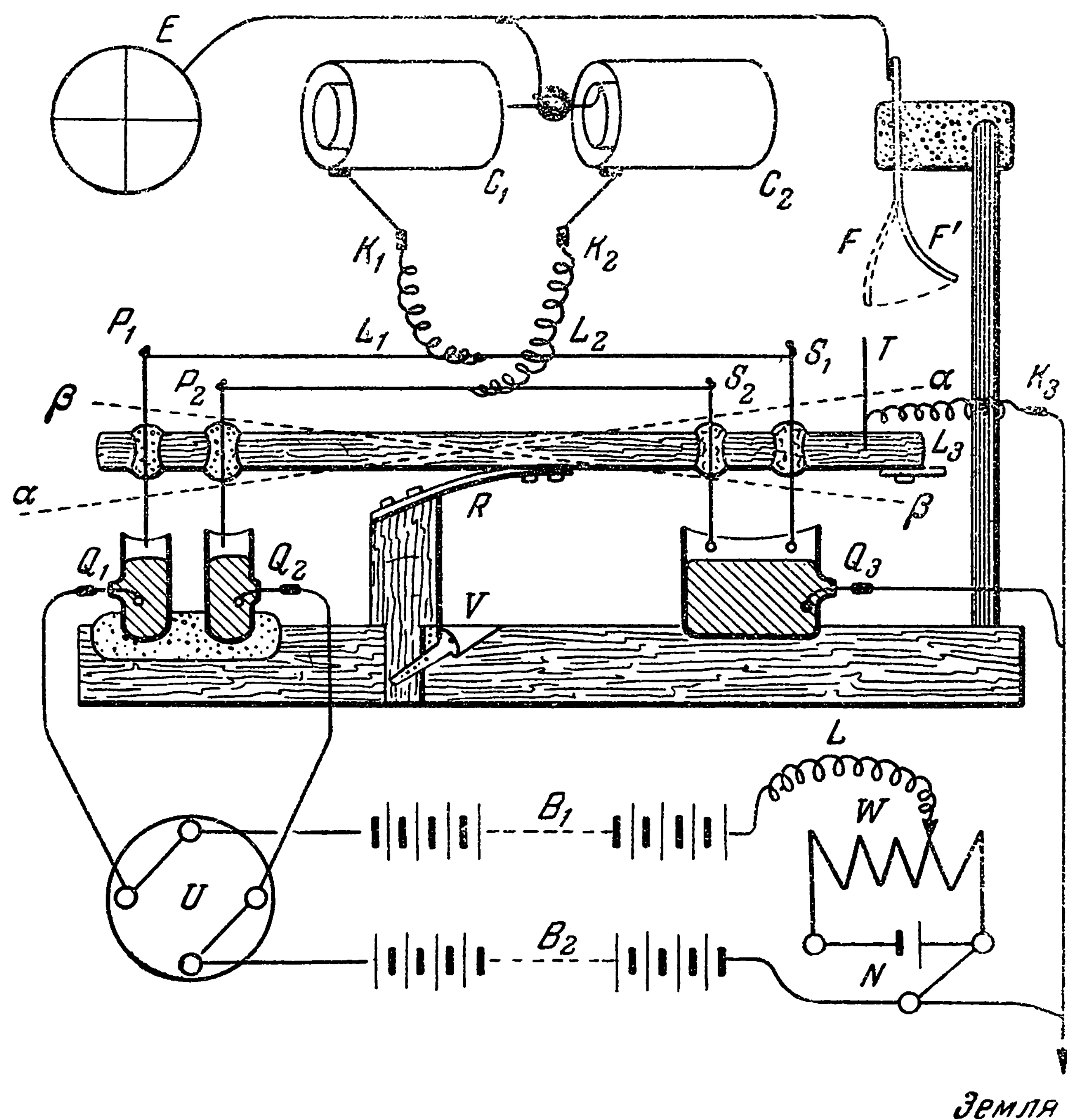


Рис. 2

[1] L. Boltzmann. Wien. Ber., (2) **69**, p. 812, 1874; Pogg. Ann., **155**, p. 403, 1875; G. Wiedemann. Electr., **2**, p. 50, 1883.

[2] J. Klemenčič, l. c. p. 736.

В легкую дощечку, длиной около 27 *см*, прикрепленную к жесткой пружине R, вставлены изолированные шеллаком платиновые стерженьки P_1, P_2, S_1 и S_2, попарно соединенные друг с другом и с помощью тонких гибких проводников L_1 и L_2 с внешними обкладками конденсаторов C_1 и C_2, металлический стерженек T соединен гибким проводником L_3 с землей.

Дощечка может быть приведена в положение $\alpha\alpha$ и закреплена в нем посредством зажима (не помещенного на рисунке); легкое нажатие освобождает зажим, дощечка переходит в положение $\beta\beta$ и здесь защелкивается.

Если сдвинуть пружину F' в положение F и затем привести дощечку в положение $\alpha\alpha$, то внешние обкладки конденсаторов C_1 и C_2 при помощи соответственных проводников L_1 и L_2, P_1 и P_2, изолированных шеллаком чашечек со ртутью Q_1, и Q_2, и переключателя U соединяются с соответственными ветвями батареи B_1 и B_2; внутренние обкладки и электрометр через посредство пружины F, стерженька T и проводника L_3 отводятся к земле.

Заставим теперь дощечку перескочить в положение $\beta\beta$; тогда вблизи положения равновесия происходит следующее: сперва отключаются от земли внутренние обкладки вместе с электрометром, так как пружина F отходит от стерженька T и перемещается в положение F', затем внешние обкладки отключаются от батареи и, наконец, через посредство стерженьков S_1 и S_2 и чашечки со ртутью Q_3 они соединяются с землею. Дощечка движется дальше и защелкивается в положении $\beta\beta$.

Переключатель U позволяет перемещать одну на место другой ветви батареи B_1 и B_2. С помощью ответвления замкнутого на большое сопротивление W нормального элемента N можно было изменять потенциал ветви B_1 на дробные части одного элемента.

Дощечка качалки делала 14 полных колебаний в одну секунду при первом отклонении в 25 *мм*. Вышеописанное переключение происходило уже при передвижении на 3 *мм* и длилось менее чем 0,002 *сек*. Отвинтив винт V и освободив зажимы K_1, K_2 и K_3, можно было снять дощечку для чистки переключателя.

2. *Конденсатор с паром* (рис. 3). Жидкость, пар которой должен был быть исследован, находилась в сосуде-капельнике T, который посредством ртутного запора Q насаживался на трубку R; жидкость капала в стеклянную трубочку R и из нее попадала в латунную трубку W (диаметром $d = 2{,}5$ *см*, длина $l = 60$ *см*), которая, по Э. Видеману [1] [4], была наполнена медными стружками. Как трубка W, так и стеклянная муфта M, в которой находился конденсатор, нагревались в цилиндрической паровой бане DD до температуры 100 и 125° С, контролируемой тремя

[1] E. Wiedemann. Pogg. Ann., 157, p. 3, 1876.

термостатами; в первом случае для нагревания служила вода, во втором — амиловый спирт.

В трубке W исследуемая жидкость испарялась, и ее пар нагревался до температуры бани; через приводящую трубку Z, вставленную на каучуковой пробке K в трубку W, пар переходил в стеклянную муфту MM, где находился конденсатор.

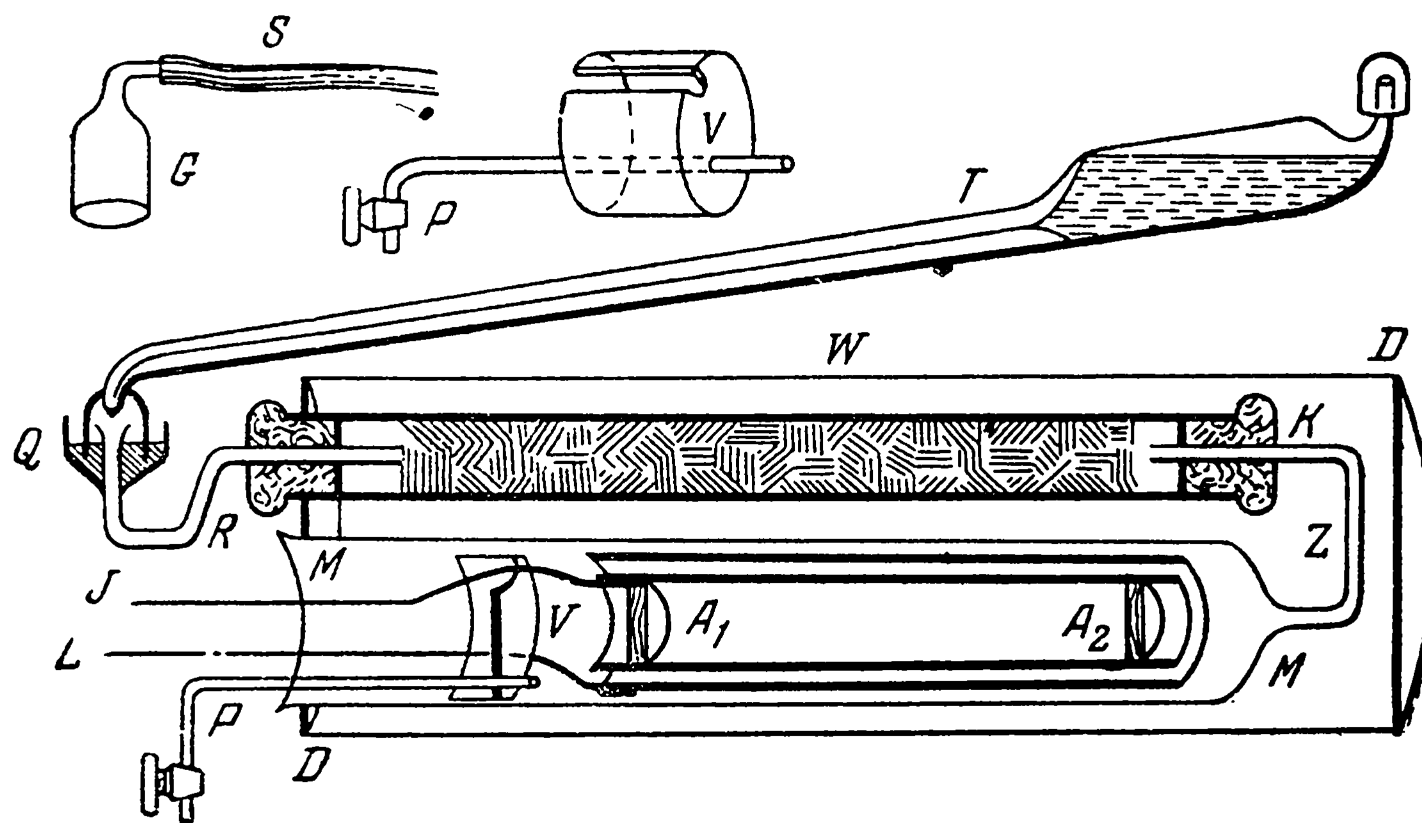


Рис. 3

Конденсатор состоял из двух концентрических никелированных толстым слоем латунных трубок (внешний диаметр внутренней трубки $d_1 = 2{,}5$ *см*, внутренний диаметр наружной — $d_2 = 2{,}9$ *см*, длина — $l = 49$ *см*), изолированных друг от друга четырьмя кварцевыми пластиночками, которые, согласно указанию Тегетмейера [5] и Варбурга[1] [6], были вырезаны параллельно оптической оси.

Так как внутренняя трубка была закрыта двумя асбестовыми пробками A_1 и A_2, а просвет между наружной трубкой и стеклянной муфтой был заполнен ватой, то пар должен был течь между обкладками конденсатора.

Для того чтобы пары, значительно более тяжелые, чем воздух, не наполняли одну только нижнюю часть конденсатора, вставлялся латунный вкладыш V; (он в увеличенном виде изображен в перспективе наверху рис. 3); если кран трубки P' закрыт, то пар может уходить только через выходное отверстие, сделанное вверху вкладыша, и должен, следовательно, сперва наполнить весь конденсатор. Через это выходное отверстие проходил также и проводник J (жесткая медная проволока) к внутреннему цилиндру конденсатора, тогда как проводник L к внешнему цилиндру лежал на стеклянной стенке.

[1] F. Tegetmeier u. E. Warburg. Wied. Ann., **32**, p. 444, 1887.

Давая подходящий наклон капельнику T, можно было регулировать число капель, а, следовательно, также и скорость пара в конденсаторе.

Когда нужно было заменить пар воздухом, капельник T снимался, и на его место помещался колокол G, который каучуковой трубкой S и помещенными за нею сушильными и промывными приборами соединялся с воздушным газометром. Можно было как угодно долго пропускать ток воздуха, высасывая посредством насоса через трубку более тяжелые пары.

3. *Стандартным конденсатором* служил воздушный конденсатор, состоявший из двух концентрических латунных трубок, диаметры которых были такие же, как и у конденсатора с паром; внешняя трубка была однако длиннее ($L = 60$ *см*), а внутренняя, напротив,— короче ($l = 45$ *см*) и от первой была изолирована пластиночками шеллака. Во внутреннем цилиндре находилась латунная трубка (диаметром $d = 2$ *см*), которую можно было более или менее выдвигать и тем несколько менять емкость стандартного конденсатора.

Перед началом опытов последний устанавливался так, чтобы его емкость была на несколько тысячных больше емкости парового конденсатора, когда тот был наполнен водухом, и меньше, когда тот был с паром.

4. *Батареи* состояли из 100 элементов Кларка [7] каждая; 190 из них были приготовлены по образцу проф. Квинке [1] [8]; величина внутреннего сопротивления каждого элемента была от 100 до 130 *ом*, так что каждая ветвь батареи имела внутреннее сопротивление от 10 000 до 13 000 *ом*.

Десять элементов имели обычную большую форму и могли быть каждый в отдельности сравниваемы электрометрически с замкнутым нормальным элементом по методу компенсации.

Таким же образом проводилось сравнение каждых десяти элементов батареи с десятью калиброванными элементами.

Относительное изменение электродвижущей силы батареи в продолжение трех месяцев было меньше пяти тысячных.

5. *Нормальный элемент*, по которому определялось напряжение батареи — это элемент Кларка с малым внутренним сопротивлением; в продолжение опыта он замыкался через сопротивление в 10 000 *ом*, что не влияло заметным образом на электродвижущую силу.

В течение исследования элемент был замкнут в общем не менее чем 100 *час* и в заключение показал падение электродвижущей силы менее чем на пять тысячных — величину, на которую разнились между собою к концу опытов также и незамкнутые элементы.

Переключатель позволял соединять с землею то один, то другой полюс элемента; посредством штепселя можно было ответвлять соответствующую электродвижущую силу.

6. *Электрометр* был типа Маскара [9]; стрелка его заряжалась сухим элементом, а одна пара квадрантов соединялась с землею.

---

[1] G. Quincke. Verhandl. Naturforschervers. Bremen., Abt. 2, p. 53. Leipzig, 1890.

Для элемента Кларка электрометр давал в одну сторону отклонение больше чем на 600 делений шкалы. При заряжениях конденсатора разность в 0,1 элемента заряжающей ветви батареи давала отклонение от 20 до 25 делений шкалы, так что можно было установить изменение емкости менее, чем на 0,0001.

Провода к электрометру и качалке находились в металлических, соединенных с землею оболочках.

7. *Переключательная доска* состояла из чашечек со ртутью, помещенных на шеллаковых стерженьках; с ее помощью производить желаемые соединения можно было быстро и надежно (сравни § 3).

8. *У термометров*, указывавших температуру паровой бани, были определены точки кипения.

9. Для определения атмосферного давления служил *барометр Фортена.*

§ 3. ИСТОЧНИКИ ОШИБОК И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ

Измеряемое «число электризации» («Elektrisierungszahl») паров было $(K'' - 1) < 0{,}01$, и потому являлось весьма желательным определять емкость конденсатора с точностью до $\pm\, 0{,}0_31$[1]. Соответственной чувствительности измерения можно достичь, с одной стороны, посредством увеличения зарядного потенциала, а с другой,— повышением чувствительности электрометра; имеющиеся источники ошибок могут однако сильно повлиять на желаемую точность и потому должны быть тщательно исследованы.

Источники ошибок распадаются на: 1) случайные, 2) нарушения изоляции, 3) меняющиеся во времени и 4) постоянные.

1. *Случайные ошибки.*

а) ошибки в отсчете (электрометра, термометров, барометра); таковые были при настоящих исследованиях далеко ниже заданных границ ошибок и не могли оказывать существенного влияния;

б) загрязнение употреблявшихся жидкостей могло быть только весьма незначительно; не мог также производить существенного влияния и растворенный в них воздух;

в) сотрясение батареи или конденсаторов может вызывать значительные неправильности и потому его должно тщательно избегать;

г) поверхность ртути в чашечках качалки должна была быть всегда зеркальна; при нечистой поверхности электрометр давал неопределенно-переменные установки.

2. *Нарушения изоляции*, поскольку они не касались парового конденсатора, могли быть только случайными. В паровом конденсаторе изоляция зависела от пропускавшегося пара: в то время как с воздухом заряд

---

[1] Т. е. 0,0001. П. Н. Лебедев иногда в своих статьях использовал подобные сокращения (*Прим. ред.*).

держался в течение минут без потери, с водяным паром мне не удалось установить достаточной изоляции (кипячение в течение целых часов кварцевых пластинок в дистиллированной воде давало только незначительный результат). Пары бензола, толуола и этилового эфира не оказывали на изоляцию заметного влияния, а другие исследовавшиеся пары оказывали, и притом в различной мере.

Как влияют эти нарушения изоляции на результат, будет сказано ниже; здесь же следует упомянуть об их исследовании.

а) изоляция проводов, внутренних обкладок и электрометра для меньших напряжений испытывались тем, что после соединения с землею внешних обкладок конденсатора прикосновением пальца к пружине F' (см. рис. 2) система заряжалась приблизительно на $^1/_2$ *в* и наблюдалось уменьшение отклонения электрометра;

б) изоляция конденсаторов при высоких напряжениях (около 150 *в*) исследовалась тем, что внутренние обкладки отводились к земле, а внешние соединялись с батареей, после чего внутренние изолировались от земли: при полной изоляции стрелка электрометра должна была оставаться в покое; в противном случае она начинала двигаться и через некоторое время выходила за пределы шкалы. Чтобы при определении емкости электрометр во время переключения качалки (т. е. в 0,002 *сек*) получал вследствие проводимости отклонение меньше чем на одно деление шкалы, нужно было, чтобы при опыте ход стрелки в течение 0,002 *сек* был менее чем на одно деление шкалы, или в одну секунду менее чем на 500 делений шкалы, что всегда и выполнялось;

в) изоляция внешних обкладок конденсатора относительно земли должна быть настолько хороша, чтобы соединение с батареей изменяло электродвижущую силу последней менее чем на $0{,}0_31$ всей ее величины, или при 100 элементах менее чем на 0,01 одного элемента. Для исследования этого две ветви батареи соединялись с помощью проводника одноименными полюсами друг против друга; свободный полюс одной ветви отводился к земле, а свободный полюс другой соединялся с электрометром, причем последний давал постоянное отклонение, происходившее от неравенства двух ветвей батареи (последнее было меньше чем 0,2 элемента); если производилось теперь соединение проводника, связывающего обе ветви батареи, с внешней обкладкой одного из конденсаторов и это влияло на напряжение отведенной к земле батареи, то изменялось соответственно и отклонение электрометра. Наблюдалось всегда, что стандартный конденсатор не производил никакого влияния, а паровой конденсатор оказывал его, но меньше чем на 0,004 элемента.

3. *Ошибки, проистекавшие от изменений в приборах с течением времени.* Сюда относятся все изменения, которые проистекают от не поддающихся дальнейшему контролю причин и которые происходят в течение опыта (от $3\frac{1}{2}$ до 4 *час*):

а) как посредством подходящего расположения наблюдений исключались изменения электродвижущей силы ветвей батареи и смещение точки нуля электрометра, говорилось уже в § 1;

б) колебания электродвижущей силы нормального элемента контролировались многократным сравнением в течение опыта этого элемента с двумя произвольно выбранными элементами батареи по электрометрическому компенсационному методу; колебания оказывались ниже ошибок наблюдения (около 0,002);

в) вследствие колебаний температуры паровой бани меняется емкость парового конденсатора, который может неодинаковым образом расширяться. Опыты дали для промежутка температуры от 20 до 100° С изменение емкости в $0{,}0_45$ на 1° С. Так как температура обыкновенно колебалась только на несколько десятых градуса, то этой ошибкой можно было пренебречь. Следует пренебречь и непосредственным влиянием колебания атмосферного давления на плотность исследуемого пара;

г) если сравнить различные определения емкости одного ряда опытов, то окажутся отклонения в среднем в $\pm$ $0{,}0_32$, что частью объясняется сильными колебаниями комнатной температуры, отражавшимися на стандартном конденсаторе. Чтобы не делать прибор слишком сложным, я должен был отказаться от бани для стандартного конденсатора.

Еще большие колебания, свыше $\pm$ 0,001, которые обнаруживались для муравьиноэтилового и пропионоэтилового эфиров, следует рассматривать как случайные.

4. *Постоянные источники ошибок*. Под этим названием объединяются те источники ошибок, которые присущи самим приборам и не могут быть исключены. Из них Клеменчич[1] особенно выдвигает следующие: 1) адсорбцию паров металлическими обкладками конденсатора, вследствие чего уменьшается расстояние между ними, и 2) постоянную не зависящую от диэлектрика конденсатора диэлектрическую постоянную изолирующих прокладок, которые в известных местах отделяют друг от друга обе обкладки. В моих опытах температура была по меньшей мере на 20° С выше температуры кипения исследуемой жидкости, а расстояние между обкладками конденсатора — около 2 *мм*; с другой стороны, кварцевые пластиночки были выбраны столь малыми, что занимали меньше одной тысячной всего промежуточного пространства между обкладками конденсатора. Этими источниками ошибок можно поэтому пренебречь. Кроме их, являлись еще два других.

а). При вытеснении пара воздухом (или наоборот) в конденсаторе неизбежно остается немного пара (или, соответственно, воздуха); в связи с этим вычисленная диэлектрическая постоянная должна быть меньше действительной.

---

[1] Klemenčič, l. c. p. 720.

При опытах перед началом измерений пропускался объем воздуха (или, соответственно, пара), превышавший в 30—100 раз объем подогревателя W (см. рис. 3), и принималось, что примесь тогда составляла меньше одного процента;

б). Наибольшим источником ошибок являлась, однако, недостаточность в изоляции конденсатора при наполнении его парами некоторых жидкостей. Количество электричества, переходящее во время переключения вследствие проводимости на внутренние обкладки, было относительно малой помехой; но так как проводимость здесь была электролитического характера, то после разряжения появлялась поляризация и влияла на отклонения электрометра: стрелка не устанавливалась неподвижно, а медленно смещалась. При бензоле, толуоле и этиловом эфире эти смещения были незаметны; при других парах они доходили до 5 делений шкалы за те 30 *сек*, в течение которых отсчитывалась установка электрометра; отсюда возникала ошибка в определении емкости парового конденсатора, но она была менее чем в $0{,}0_{3}2$.

При пропионоэтиловом эфире установки электрометра были более ненадежны, а при водяном паре колебания в отклонениях электрометра были так велики, что нельзя было сделать никакого измерения.

Устранения этих источников ошибок можно было бы однако достигнуть (см. § 5) только существенными видоизменениями парового конденсатора.

§ 4. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ НЕКОТОРЫХ ПАРОВ

Жидкости, пары которых исследовались, были получены от К. Ф. Кальбаума в Берлине; обозначенные звездочкою служили уже ранее Терешину для его исследований, остальные были доставлены вновь.

Измерения давали отношение диэлектрической постоянной пара к постоянной воздуха при температуре парового конденсатора и наличном давлении атмосферы.

Диэлектрическая постоянная K' воздуха по Больцману и Клеменчичу равна $K' = 1{,}0_{3}59$ при 760 *мм* и 0° С; принимая во внимание, что величина $(K - 1)$ пропорциональна плотности газа, найдем диэлектрическую постоянную воздуха при 760 *мм*.

При 0° С	$K' = 1{,}0_{3}59$
При 100	$K' = 1{,}0_{3}43$
При 120	$K' = 1{,}0_{3}41$
При 126	$K' = 1{,}0_{3}40$

С помощью этих величин для воздуха были вычислены диэлектрические постоянные паров и приведены к 760 *мм* давления.

Как пример здесь могут быть приведены два ряда наблюдений и 4 ряда опытов № 14. В табл. 1, 2 обозначают: R' — нулевую точку электрометра,

Таблица 1

Воздух. $T = 100°$ C; $B = 764$ *мм*

Время *ч м*	R'	Δ'_{1+}	E'_1	Δ'_{1-}	E'_2	Δ'_{2+}	E'_3	Δ'_{2-}	E'_4
4 45	474	±0,0	472	+0,3	476	+0,1	451	+0,4	451 *
4 55	76		73		77		49		53
4 56	78		76		81		54		58
5 04	81		81		81		53		62
Средние величины	477	±0,0	475	+0,3	479	+0,1	452	+0,4	456

Таблица 2

Этиловый спирт. $T = 100°$ C; $B = 764$ *мм*

Время *ч м*	R''	Δ''_{1+}	E''_1	Δ''_{1-}	E''_2	Δ''_{2+}	E''_3	Δ''_{2-}	E''_4
6 04	492	+0,5	511	—0,2	478	+0,6	492	—0,3	501
6 13	95		12		84		92		04
6 14	95		14		80		91		05
6 22	97		15		82		92		07
Средние величины	495	+0,5	513	—0,2	481	+0,6	492	—0,3	504

* Стрелки указывают последовательность рядов наблюдений.

E'_1, E'_2, E'_3, и E'_4 — его установки после разряда конденсаторов, соответствующие прибавочным электродвижущим силам Δ'_{1+}, Δ'_{1-}, Δ'_{2+} и Δ'_{2-} (см. § 1); из них могут быть найдены интерполяцией величины Δ'_{+} и Δ'_{-}. Такое же значение имеют и величины с двойным значком ″.

Отсюда получается:

Из E'_1 и E'_3	$\Delta'_{+} = -0{,}009$
» E'_2 » E'_4	$\Delta'_{-} = +0{,}309$
» E''_1 » E''_3	$\Delta''_{+} = +0{,}586$
» E''_2 » E''_4	$\Delta''_{-} = -0{,}261$

По формуле (5) можно вычислить диэлектрическую постоянную K'' пара, положив $K = 1{,}0_343$ и приняв во внимание, что число элементов заряжающей ветви батареи было $n = 90$.

$$K'' = K'\left[1 + \frac{(\Delta''_+ - \Delta''_-) - (\Delta'_+ - \Delta'_-)}{2n}\right] = 1{,}0_343\left(1 + \frac{0{,}847 + 0{,}318}{180}\right);$$

$$K'' = 1{,}00690\,.$$

Приняв во внимание, что у газов величина (K—1) прямо пропорциональна давлению и что во время опыта давление атмосферы было $B = 764$ *мм*, получим для диэлектрической постоянной пара этилового спирта при 760 *мм* давления и температуре 100° С величину: $K = 1{,}00686$ или, округлив, $K = 1{,}0069$.

Таблица 3

Диэлектрические постоянные паров при 760 *мм*

N	Вещество	T	I	II	III	IV	K
4	Бензол	100	1,0030	1,0028	1,0028	1,0026	
8	»	100	27	27	26	26	1,0027
7	»	100	28	27	—	—	
18	Толуол	126	1,0044	1,0043	—	—	1,0043
1	Этиловый эфир	100	1,0045	1,0044	1,0046	1,0046	
13	»	100	43	42	46	45	1,0045
15	»	100	45	44	46	—	
6	Метиловый спирт . . .	100	1,0056	1,0057	1,0057	1,0057	1,0057
5	» »	100	58	57	—	—	
14	Этиловый спирт . . .	100	1,0069	1,0065	1,0067	1,0067	
2	»	100	62	59	—	—	1,0065
3	» »	100	60	60	—	—	
11	» »	100	69	69	—	—	
10	* Муравьинометиловый эфир	100	1,0071	1,0068	1,0069	1,0069	1,0069
9	* Муравьиноэтиловый эфир	100	1,0083	1,0090	1,0083	1,0076	1,0083
12	* Уксуснометиловый эфир	100	1,0073	1,0072	—	—	1,0073
16	* Пропионоэтиловый эфир	119	1,0151	1,0136	—	—	1,0140
17	* Пропионоэтиловый эфир	122	146	271	—	—	

Один «большой» ряд опытов обнимает пять последовательных наполнений, а именно: воздухом — паром — воздухом — паром — воздухом. Четыре разности емкостей дают четыре величины для диэлектрической постоянной, которые указаны в колонках I, II, III и IV табл. 3.

В табл. 3 буква N обозначает порядковый номер ряда опытов, а буква K — среднюю величину диэлектрической постоянной для температуры опыта T.

Для этилового эфира Клеменчич [1] нашел при 0° С и 760 *мм* $K = 1{,}0074$, тогда как из моих опытов следует $K = 1{,}0061$.

Несмотря на все старания, мне не удалось определить диэлектрическую постоянную водяного пара, так как в его присутствии кварцевая изоляция парового конденсатора при 125°С отказывалась уже служить. Из предварительных опытов, которые проводились в воздушной бане при температуре свыше 160° С величина K для водяного пара оказывалась равной 1,001, но ее однако надо рассматривать только как указание на порядок этой величины.

§ 5. ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ ПАРОВ

Полученные опытные указания относительно выработанного метода могут быть сведены к следующему:

а) настоящий метод имеет то преимущество, что не зависит от емкостей и остаточных зарядов соединительных проводников и качалки; с примененными вспомогательными приспособлениями он дает точность отдельного измерения в $\pm 0{,}0_3 1$;

б) малые колебания в величине емкости стандартного конденсатора, происходящие от изменения комнатной температуры, могли бы быть устранены помещением стандартного конденсатора в ту же паровую баню, где находится и конденсатор с паром;

в) для устранения вредных влияний поляризации в паровом конденсаторе можно было бы помещать изолирующие ножки, на которых покоится внутренняя обкладка, не на внешней обкладке, а на металлических пластинках, соединенных с землей; тогда при заряжении с внешних обкладок на внутренние не могло бы перейти никакого заряда и поляризация была бы исключена;

г) при употреблении конденсатора с паром, свободно вытекающим в атмосферу, диэлектрическая постоянная пара может быть определена с точностью в $\pm 0{,}0_3 2$; этот метод может быть применим в тех случаях, в которых по каким-нибудь причинам изоляция не может быть прилажена в горячем паровом пространстве и механическое соединение обкладок конденсатора приходится делать снаружи. Замкнутый конденсатор, однако, следует предпочесть вследствие малого расхода жидкости и быстрого че-

[1] J. Klemenčič, l. c. p. 757.

редования измерений; проводник к внутренней обкладке можно ввести внутрь через кварцевое окошко;

д) небольшое изменение в устройстве качалки позволило бы сделать измерения гораздо надежнее: при данном на рис. 2 расположении приборов паровой конденсатор остается постоянно в соединении с электрометром и влияет на его отклонение своей проводимостью и поляризацией все то время, пока тот устанавливается (свыше 30 *сек*); такое влияние можно уменьшить, отключая тотчас же по окончании разряжения паровой конденсатор от электрометра и нормального конденсатора, что может быть выполнимо самой же качалкой.

§ 6. ПРОВЕРКА ТЕОРИИ МОССОТТИ — КЛАУЗИУСА

На основании фарадеевского [1] предположения, что диэлектрики состоят из шарообразных, проводящих, друг с другом не соприкасающихся телец, Моссотти [2] развил математическую теорию диэлектрической поляризации; он исследовал вопрос таким же образом, каким Пуассон исследовал магнитную индукцию, и выводил отсюда общие свойства диэлектриков.

Независимо от Моссотти пришел к аналогичному толкованию диэлектрической поляризации и Клаузиус [3]. Предположив, что проводящие молекулы имеют шарообразную форму и что их расстояние велико по сравнению с их диаметром, он нашел простую зависимость между относительным заполнением пространства g (т. е. отношение действительно занятого молекулами тела объема к видимому объему, занимаемому всем телом) и диэлектрической постоянной K тела, а именно:

$$g = \frac{K-1}{K+2}; \qquad (6)$$

$$K = \frac{1+2g}{1-g}. \qquad (7)$$

Диэлектрическая постоянная вещества зависит, таким образом, только от относительного заполнения им пространства.

Несколько иначе выводятся эти положения у Г. Видемана [4] [10] и у Пуанкаре [5].

Маскар и Жубер [6] [11] исследуют вопрос, представляя сперва шаро-

[1] M. Faraday. Exp. Res., 14, 1679.

[2] F. O. Mossotti. Bibl. Univ. de Cenéve (Arch. Sci phys. et nat.), 6, p. 193, 1847; Mem. mat. e fis. Soc. Ital. d. sci. Modena, (2) 14, p. 49, 1850.

[3] R. Clausius. Mechan. Wärmetheorie. Zweiter Theil; Mechan. Behandl. d. Electr., 3, p. 94. Braunschweig, 1879.

[4] G. Wiedemann. Lehre von der Electr., 2, p. 12, 1883.

[5] H. Poincaré. Electricité et Optique, 1, p. 41. Paris, 1890.

[6] E. Mascart et J. Joubert. L'électr. et le magnét. 1, art. 167. Paris., 1886.

образные молекулы непроводящими телами с большой диэлектрической постоянной; для предельного случая, когда молекулы непроводящи и имеют чрезвычайно большую диэлектрическую постоянную (или когда они уже суть проводники), получаются соотношения (6) и (7).

Если из формулы (6) образовать выражение

$$\frac{d}{g} = \frac{K+2}{K-1} \cdot d = D = \text{const}, \qquad (8)$$

где d обозначает плотность вещества, при которой диэлектрическая постоянная его равняется K, то отношение d/g для одного и того же вещества есть величина постоянная и D есть «наибольшая плотность» вещества, или плотность его молекул. Это отношение (8) было выведено Лорентцом [1] и предложено как эмпирическая формула Негреано [2] [12].

Если положим, согласно Максвеллу, $K = n^2$ (где n есть показатель преломления для бесконечно длинных волн) и возьмем обратную величину выражения (8), то получим формулы Лорентца [3] и Лоренца [4] [13].

Соотношение (8) может быть только приблизительным, так как предположение о шарообразности молекул на самом деле не соответствует действительности; пока нельзя еще дать формулам такой вид, который бы был независим от этого предположения и давал более общую связь между диэлектрической постоянной вещества и его плотностью, так как о форме молекул ничего не известно.

Следующая ниже проверка соотношения (8) проведена для 1) изменений плотности вследствие изменения давления; 2) изменений плотности вследствие теплового расширения; 3) изменений плотности вследствие перемены агрегатного состояния; 4) связи с результатами теории газов.

Следует здесь особенно заметить, что соотношение (8), как показывают наблюдения, приблизительно годно также и для жидких тел, хотя допущенное при вычислении предположение, что расстояние молекул велико по сравнению с их диаметром, не отвечает здесь действительности.

Приводимые ниже плотности d отнесены к воде при 4°С и с помощью известных коэффициентов расширения γ приведены к температуре, при которой наблюдалась диэлектрическая постоянная K. Величина d и γ, поскольку они не указаны у наблюдателей, взяты из «Таблиц Ландольта и Бернштейна» (Tabellen von Landolt und Börnstein. Berlin. 1883).

---

[1] H. Lorentz. Wied. Ann., **9**, p. 642, 1880.

[2] Negreano. Compt. rend., **104**, p. 425, 1887; Journ. de phys., (2) **6**, p. 569, 1887; Beibl., **11**, p. 463, 1887.

[3] H. Lorentz, l. c. p. 654.

[4] L. Lorenz. Wied. Ann. **11**, p. 77, 1880; **20**, p. 19, 1883.

1. *Действие давления*

Для газов и паров, диэлектрическая постоянная которых мало разнится от единицы, уравнение (8) можно написать в виде

$$(K-1)=\frac{3}{D}\,d\,, \tag{9}$$

т. е. для газов и паров величина $(K-1)$ пропорциональна плотности или при постоянной температуре давлению [1].

Этот закон был найден Больцманом [2] и подтвержден Клеменчичем [3].

2. *Тепловое расширение*

Если постоянная D определена при какой-нибудь плотности тела, то диэлектрическая постоянная K для данной плотности d может быть вычислена из уравнения (8), решенного относительно K,

$$K=\frac{D+2d}{D-d}\,. \tag{10}$$

Табл. 4 содержит для некоторых жидкостей величины d и K, наблюденные при разных температурах: из одной пары величин вычислялось D и с помощью его потом для других температур вычислялось K.

Согласие наблюденных и вычисленных величин оказалось неожиданно хорошим. Большие отклонения у алкоголя могут зависеть от значительных колебаний наблюденной величины. Следует обратить еще особенное внимание на то, что у первых трех жидкостей значительным изменениям в плотности соответствуют только малые изменения диэлектрической постоянной, тогда как у алкоголя и воды ход изменений совсем иной, в согласии с вычислением.

Относительно зависимости диэлектрической постоянной от температуры имеется исследование Кэсси [4] [5], но так как большая часть исследованных им веществ была химически неопределенна, то эти измерения здесь не могут быть использованы. То же самое относится также и к опытам Гопкинсона [5].

---

[1] Ср. Adler. Wien. Anzeiger., (2) **27**, p. 277, 1890 [14].
[2] L. Boltzmann, l. c. p. 807.
[3] J. Klemenčič, l. c. p. 736.
[4] W. Kassie. Phil. Trans., **181**, p. 1, 1890; Proc. Roy. Soc., **46**, p. 357, 1889; Beibl., **14**, p. 132, 1890.
[5] Hopkinson, Wied. Electr., **2**, p. 42, 1883.

Таблица 4

Вещество	T	d	D	$K_{выч}$	$K_{набл}$	Источник
Бензол	17,3°	0,883	2,866	—	2,336	Палац[1] [5]
»	47,3	0,841	—	2,246	2,243	»
Толуол	17,2	0,867	2,772	—	2,365	»
»	47,2	0,838	—	2,300	2,255	»
Вазелиновое масло . .	17,1	0,880	3,094	—	2,192	Фукс[2] [5]
»	57,9	0,849	—	2,135	2,141	»
Алкоголь	27	0,8009	0,8982	—	25,7	Роза[3] [15]
»	10	0,8129	—	29,6	27,5	»
Вода	25	0,9971	1,0371	—	75,7	»
»	31	0,9954	—	72,6	73,7	»
»	17	0,9988	—	79,2	78,7	»
»	10	0,9997	—	81,2	80,2	»
»	4	1,0000	—	81,8	82,3	»

[1] A. Palaz. Capac. induct. spec. de quelques diél. Inauguraldissert. [Lausanne 1886; J de Phys, (2) 5, p. 370, 1885; Beibl., 11, p. 259, 1887.

[2] V. Fuchs. Wien, Ber., (2) 98, p. 1240, 1889.

[3] E. Rosa. Phil. Mag., (5) 31, p. 188, 1891. Приведенные величины заимствованы из таблицы. Алкоголь, видимо, не был безводен.

3. *Изменения агрегатного состояния*

Для паров мы будем вычислять величину ($K-1$) по формуле (9), а величину постоянной D заимствуем из данных для жидкого состояния.

В табл. 5 величины T', K', d' и D относятся к жидкому состоянию, а T, d и ($K-1$) — к парообразному состоянию при давлении 760 *мм*.

Порядок, в котором идет возрастание величины ($K-1$) от вещества к веществу,— один и тот же для наблюденных и вычисленных значений; лучшего согласия нельзя и ожидать, так как предположения Клаузиуса для жидкого состояния не отвечают действительности.

Вычисление в согласии с наблюдением показывает, что вещества, у которых в жидком состоянии диэлектрические постоянные очень велики, в газообразном состоянии часто имеют такие величины ($K-1$), которые меньше соответствующих величин для веществ, имеющих в жидком состоянии меньшие диэлектрические постоянные.

Весьма большое отклонение у пропионоэтилового эфира может проистекать от неточного измерения величины ($K-1$).

Таблица 5

Вещество	T'	K'	d'	D	T	a	$(K-1)_{выч}$	$(K-1)_{наб}$	Источник
Вода	14	83,7 [1]	0,999	1,04	170	0,0005	0,0014	(0,001)	Лебедев [2]
Метиловый спирт	14	32,7	0,800	0,88	100	0,0010	34	0,0057	»
Этиловый спирт	14	27,0	0,798	0,89	100	15	51	65	»
Муравьинометиловый эфир . .	14	9,0	0,980	1,31	100	20	46	69	»
Муравьиноэтиловый эфир . . .	14	9,1	0,916	1,26	100	24	57	83	»
Уксусноmетиловый эфир . . .	14	7,7	0,932	1,35	100	24	53	73	»
Пропионоэтиловый эфир . . .	14	6,0	0,908	1,45	120	32	66	(0,0140)	»
Этиловый эфир. .	7	4,76 [3]	0,740	1,33	100	24	54	0,0045	»
» »	—	—	—	—	0	33	74	74	Клеменчич [4]
Сероуглерод . .	7	2,71	1,283	3,53	0	34	29	29	»
Толуол	17	2,36 [5]	0,867	2,77	126	29	31	43	Лебедев [2]
Бензол	17	2,34	0,883	2,87	100	0,0025	0,0026	0,0027	»

[1] S. Tereschin [16]. Wied. Ann., 34, p. 799, 1889.
[2] См. табл. 1.
[3] G. Quincke. Wied. Ann., 19, p. 725, 1883, Wied. Electr., 4, p. 1270, 1885.
[4] J. Klemenčič. I. c. p. 754.
[5] См. табл. 2.

4. *Отношение к результатам теории газов*

Величину заполнения пространства g для газа и пара мы можем определить из их диэлектрических постоянных K, написав с достаточной точностью уравнение (6) в упрощенном виде:

$$g = \frac{K-1}{3}. \tag{11}$$

С другой стороны, величина g пространственного заполнения получается также из ван-дер-ваальсовского [1] уравнения состояния, где $g = \frac{b}{4}$.

В табл. 6 приведены величины пространственного заполнения $g \cdot 10^5$ для 760 *мм* и 0°C.

Весьма достопримечательным результатом является то, что порядок величины пространственного заполнения по обеим теориям одинаковый.

[1] J. van der Waals. Continuität der flüssigen and gasförmigen Lustandes. Deutsch von Roth. Leipzig 1881, p. 136.

Таблица 6

Вещество	$g=\frac{b}{4}$	$g=\frac{K-1}{3}$		
	Ван-дер-Ваальс	Больцман	Клеменчич	Лебедев
Закись азота	48	33	39	—
Угольная кислота	50	32	33	—
Этилен	56	44	55	—
Хлористый этил	97	—	517	—
Сероуглерод	82	—	97	—
Сернистая кислота	62	—	318	—
Эфир	144	—	248	203
Алкоголь	93	—	—	297
Бензол	128	—	—	123

Дальнейшие приложения формулы (6) к молекулярной физике находятся в статьях Дорна [1] [17] и Экснера [2] [18]; и там согласие результатов с результатами, найденными другими путями, вполне удовлетворительно.

Результаты проведенной проверки моссотти — клаузиусовской теории диэлектриков могут быть резюмированы следующим образом:

а) предположение Фарадея, что молекулы суть электропроводящие тела, или предположение Маскара и Жубера, что молекулы обладают чрезвычайно большой диэлектрической постоянной, не приводят к противоречию с наблюденными явлениями и объясняют последние простым и непринужденным образом;

б) соотношением (8) можно с выгодою пользоваться, как эмпирической формулой, связывающей плотность вещества с его диэлектрической постоянной.

Дальнейшее развитие зависимости между пространственным заполнением и диэлектрической постоянной вещества связано со знанием формы молекул и пока еще не может быть дано.

Физический институт Страсбургского университета
Май 1891 г. [19].

---

[1] E. Dorn. Wied. Ann., **13**, p. 378, 1881.

[2] E. Exner. Wien. Ber., (2) **91**, p. 850, 1885; Exn. Rep., **21**, p. 446, 1885; Beibl., **9**, p. 714, 1885; Journ. de Phys., (2) **5**, p. 240, 1885.

2. ОБ ОТТАЛКИВАТЕЛЬНОЙ СИЛЕ ЛУЧЕИСПУСКАЮЩИХ ТЕЛ [1]

Maxwell [2] показал, что световой или тепловой луч, падая на поглощающее тело, производит на него механическое давление в направлении падения; величину этой давящей силы P можно выразить в форме

$$P = \frac{E}{V}, \tag{1}$$

где — энергия, которая падает в единицу времени на поглощающее тело, а v — скорость луча в той среде, в которой находится тело.

Независимо от Maxwell'а пришли к подобному же результату Bartoli [3] [1] и Boltzmann [4], рассматривая случай отражения света от зеркала; Bartoli нашел, что при нормальном падении давление, производимое лучом на зеркало, вдвое больше, чем то, которое тот же луч производил бы на поглощающее тело по Maxwell'у.

Попытки Bartoli экспериментально доказать существование этого давления не увенчались успехом, так как ему не удалось освободиться от «радиометрических» явлений.

Цель настоящей статьи заключается в том, чтобы показать, какую долю ньютоновской силы притяжения составляет отталкивание лучеиспусканием как для Солнца, так и для всякого шаровидного тела, температура которого не равна абсолютному нулю. Полученные формулы применимы однако только для абсолютно черных тел, размеры которых велики сравнительно с длинами волн падающих на них лучей; поэтому для интересных вопросов относительно отталкивания кометных хвостов Солн-

---

[1] Читано автором в физическом коллоквиуме проф. Ф. Кольрауша в Страсбурге 30(18) июля 1891 г.

[2] Maxwell. Electr. and Magn., Art. 792.

[3] A. Bartoli. Exners. Rep., 21, p. 198, 1885; см. также у Boltzmann'a

[4] L. Boltzmann. Wied. Ann., 22, p. 31, 1884.

цем, а также и взаимодействиядвух соседних молекул в телах может быть намечен только путь к решению.

Так как только порядок отношения действующих сил представляет интерес, то мы разберем здесь простейший случай, где притягиваемое тело шаровидно и поглощает всю на него падающую энергию, лучеиспуская ее затем равномерно во всех направлениях, и приведем числовые выкладки в первом приближении.

Принимая вместе с Langley [2] количество тепла C, которое доставляет нам в одну минуту пучок солнечных лучей на 1 *см*^{2} поперечного сечения (так называемая солнечная постоянная), равным 3 *кал* [3], а механический эквивалент тепла $B = 425$ *г·м*, мы получаем энергию лучей E, падающую на 1 *см*^{2} в 1 *сек*

$$E = \frac{C}{60} \cdot B = \frac{3}{60} \cdot 425 = 21 \text{ г·м}.$$

Принимая скорость света $V = 3 \cdot 10^8$ *м/сек*, мы можем вычислить по формуле (1) то давление P_0, которое производит пучок солнечных лучей с поперечным сечением в 1 *см*^{2} на поглощающее тело, находящееся от Солнца на таком расстоянии, как Земля

$$P_0 = \frac{E}{V} = \frac{2}{3} \cdot 10^{-7} \text{ г}^1,$$

или в абсолютной мере

$$P_0 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ дин}. \tag{2}$$

Если мы примем расстояние Земли от Солнца $\rho = 15 \cdot 10^{12}$ *см*; скорость Земли по орбите $\gamma = 3 \cdot 10^6$ *см/сек*, то солнечное ускорение a на расстоянии Земли будет

$$a = \frac{\gamma^2}{\rho} = 0{,}6 \text{ см/сек}^2.$$

Таким образом, на расстоянии ρ Солнце притягивает 1 *г* массы с силою A

$$A = 0{,}6 \text{ дин}. \tag{3}$$

Действие, оказываемое Солнцем на обращающиеся вокруг него тела, составляется, во-первых, из ньютоновского притяжения, во-вторых, из отталкивательных сил излучения.

Пусть нам дано шаровидное тело, которое поглощает всю на него падающую энергию Солнца и лучеиспускает ее затем равномерно во все стороны, и пусть это тело находится на расстоянии ρ от Солнца. Обозначив его радиус в *см* через r и плотность через δ, мы можем вычислить силу

---

[1] Давление пучка солнечных лучей на 1 *м*^{2} поперечного сечения равняется $P' = {}^2/_3$ *мг*.

G, с которой оно притягивается Солнцем, и силу H, с которою оно отталкивается им

$$G = \frac{4}{3}\pi r^3 \delta A;$$
$$H = \pi r^2 P_0.$$

Отсюда легко вычислить ту результирующую силу, с которой Солнце притягивает данное тело, и выразить ее в долях ньютоновской силы притяжения:

$$F = \frac{G - H}{G} = 1 - \frac{H}{G} = 1 - \frac{3}{4}\frac{P_0}{Ar\delta}. \qquad (4)$$

Для данного тела эта сила F представляет собою характеристическую постоянную, не зависящую от расстояния от Солнца, так как величины как P_0, так и A в одинаковой степени зависят от этого расстояния.

Заменяя в уравнении (4) величины P_0 и A их числовыми значениями (2) и (3), мы получаем

$$F = 1 - \frac{10^{-4}}{r\delta}. \qquad (5)$$

Отсюда видно, что для всех тел, у которых $\delta > 1$ и $r > 10$ *м*, отступления от законов Ньютона настолько малы, что не могут быть открыты точнейшими наблюдениями.

Чем меньше мы возьмем радиус r тела, тем более будет выступать отталкивательная сила Солнца.

В кометных хвостах, которые, как известно [1], состоят преимущественно из газообразных углеводородов, мы имеем дело с отдельными молекулами, радиус которых $r < 10^{-8}$ *см*, а плотность $\delta < 10$, как показал F. Exner [2]; в этом случае, однако, наша формула (5) не применима во всей строгости, так как отдельные молекулы не суть абсолютно черные тела и радиус их мал сравнительно с длиной волны падающего на них света; поэтому мы можем только утверждать, что отталкивание хвостов, во много раз превышающее притяжение их, притом различное для различных веществ хвоста и обратно пропорциональное квадрату расстояния от Солнца, не противоречит нашей формуле. Из наблюдений кривизны 40 кометных хвостов Ф. А. Бредихин [3] [5] нашел три величины этой отталкивательной силы: 17; 1,1 и 0,2; эти величины могут быть без натяжки объяснены вышеуказанным механическим действием солнечных лучей, чем

---

[1] Scheiner [4]. Spectralanalyse der Gestirne, 3, cap. 3. Leipzig, 1890.

[2] F. Exner. Sitzungsber. der Wein. Akad., 91, II, p. 850, 1885. Exners Rep. d. Phys., 21, p. 446, 1885; Wied. Beibl., 9, p. 714, 1885; Journ. de Phys., (2) 5, p. 240, 1885.

[3] Th. Bredichin. Revision des valeurs numeriques de la force repulsive. En comission chez Voss. Leipzig, 1885.

устраняется гипотеза электростатического заряда Солнца, разработанная Zöllner'ом [1] [6]; нужно заметить, что уже Faye [2] [7] выразил предположение, что отталкивательную силу Солнца надо искать в его лучеиспускании, однако он не наметил пути к решению вопроса.

Только что разобранный вопрос об отталкивательной силе Солнца можно решить и для более общего случая, где, вместо Солнца, мы имеем тело, радиус которого R, плотность Δ, а количество тепла, лучеиспускаемое 1 *см*^{2} его поверхности в 1 *сек*, равно Q. К этому общему случаю мы можем перейти, исходя из добытых результатов для Солнца и имея в виду, что:

Радиус Солнца	$R_0=7\cdot 10^{10}$ *см*
Плотность его	$\Delta_0=1{,}4$
Лучеиспускание 1 *см*^{2} его поверхности в 1 *сек*	$Q_0=2000$ *кал* [3]

Обозначив через S отношение отталкивательной силы лучеиспускания тела к его ньютоновской силе притяжения, мы можем утверждать, что S прямо пропорционально Q, обратно пропорционально[4] Δ и R.

Для Солнца эта величина S_0 из формулы (5)

$$S_0=\frac{10^{-4}}{r\delta}.$$

Для всякого другого тела мы имеем

$$S=S_0\frac{Q}{Q_0}\cdot\frac{\Delta_0}{\Delta}\cdot\frac{R_0}{R} \tag{6}$$

или, заменяя S_0, Q_0, Δ_0 и R_0 приведенными выше величинами,

$$S=\frac{10^{-4}}{r\delta}\cdot\frac{Q}{2000}\cdot\frac{1{,}4}{\Delta}\cdot\frac{7\cdot 10^{10}}{R}=5\frac{Q}{r\delta R\Delta}10^3. \tag{7}$$

Равнодействующая притягательной и отталкивательной силы этого тела

$$K=1-S=1-5\frac{Q}{r\delta R\Delta}10^3. \tag{8}$$

---

[1] Zöllner. Über die Natur der Kometen. Leipzig, 1872.

[2] Faye. C. R., 93, p. 11, 362, 1881.

[3] Если мы примем, что на расстоянии Земли от Солнца $\rho=15\cdot 10^{12}$ *см* на 1 *см*^{2} падают в 1 *мин* 3 *кал* или в 1 *сек* 0,05 *кал*, то 1 *см*^{2} на поверхности Солнца, в расстоянии $R_0=7\cdot 10^{10}$ *см* от центра, лучеиспускает

$$Q_0=0{,}05\left(\frac{\rho}{R_0}\right)^2=2000 \text{ кал в 1 сек.}$$

[4] Так как притягательная сила массы пропорциональна R^3, а отталкивательная сила лучеиспускания пропорциональна R^2.

Для черного тела, находящегося при 0°C, Christiansen[1] [8] нашел, что 1 *см*^{2} его поверхности лучеиспускает в 1 *сек* количество Q'

$$Q' = (0{,}21 \cdot 10^{-12}) \cdot 273^4 = 0{,}0037 \text{ кал } [9].$$

Таким образом, сила K', с которой шаровидное абсолютно черное тело, находящееся при 0°C и имеющее радиус R *см* и плотность Δ, будет притягивать в мировом пространстве шаровидное абсолютно черное тело, радиус которого r *см*, а плотность δ, будет приблизительно равна

$$K' = 1 - \frac{20}{r\delta R\Delta}. \qquad (9)$$

Отсюда следует, что два шаровидных тела, температура которых 0° С, плотности $\Delta = \delta = 10$ и радиусы $R = r = 4$ *мм*, в мировом пространстве не притягивают и не отталкивают друг друга. Переходя затем к телам, радиус которых еще меньше, мы видим, что у них сила отталкивания значительно превышает силу ньютоновского притяжения: так, пылинки, радиус которых не превышает одной тысячной миллиметра, будут отталкиваться при 0°C в мировом пространстве с силою, порядок которой в миллион раз превышает порядок сил их ньютоновского притяжения.

Принимая радиус тела все меньше и меньше, мы можем таким образом перейти к молекулярным размерам. Для молекул, однако, наша формула (8) неприменима, так как молекулы не суть абсолютно черные тела и как размеры их, так и их взаимные расстояния в телах малы сравнительно с длинами лучеиспускаемых волн. Взаимодействие молекул можно рассматривать как более сложный случай, как действие резонаторов друг на друга.

Если формула (8) и не дает нам величины лучистого взаимодействия молекул, то она обращает наше внимание на то обстоятельство, что при изучении сущности так называемых «молекулярных сил» мы не можем пренебрегать силами, возникающими от лучеиспускания, не определив предварительно той доли молекулярных сил, которую они составляют, и не отделив эти известные силы от неизвестных.

Москва, Август 1891

---

[1] Christiansen. Wied. Ann., 19, p. 279, 1883.

3. О ДВИЖЕНИИ ЗВЕЗД ПО СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ[1]

Милостивые Государыни и Милостивые Государи!

С самых первых шагов изучения природы, мы замечаем стремление человека захватить изучаемый предмет во всей его полноте и подойти к границам возможного; при изучении материи, из которой состоит все окружающее нас, такими границами являются, с одной стороны, мир молекул, а, с другой,— рассеянные в бесконечном пространстве звезды.

В предыдущем сообщении кн. Голицин познакомил нас с новейшими успехами физического исследования молекул и указал на те пути, которыми мы, исходя из свойств нашей материи, можем узнать размеры и движения молекул, ее составляющих, свести сложные явления на простое движение. Переносясь в мир молекул, мы должны были отказаться от наших обыденных представлений о большом и малом, о быстром и медленном: то, что в обыденной жизни нам кажется простым, как например пуговица нашего платья или наши пальцы, которыми мы без труда шевелим,— все это является нам бесконечно огромными, бесконечно сложными системами молекул.

В противоположность кн. Голицину, я позволю себе познакомить Вас с новейшими успехами исследования материи всей Вселенной и поговорить о ее движении, о движении звезд. И тут наше представление о большом и малом бессильно: если мы, мысленно отделившись от Земли, понесемся по направлению любой из бесчисленных звезд и будем смотреть на оставленную нами солнечную систему, то скоро, гораздо раньше, чем мы достигнем звезды, солнечная система станет для нас еле заметной звездочкой, теряющейся в сонме других, ей подобных; тогда все наши земные треволнения, вся наша сложная жизнь явятся нам бесконечно ничтожными, так как мы перенеслись в мир иных размеров, управляемый иными

---

[1] Читано в публичном заседании 11 февраля 1892 г., с дополнениями.

законами. Те исследования, о которых я буду говорить, покажут нам, что этот мир не находится в мертвом покое; он движется и живет своей особенной, таинственной жизнью; мы познакомимся с простыми способами измерять скорости движения отдельных звезд, и у нас невольно явится вопрос, аналогичный, но обратный вопросу молекулярной физики: нам известны движения отдельных звезд — каким общим законам удовлетворяют они? Какими особыми «свойствами» обладает вся Вселенная?

Ответ на эти вопросы кроется еще в далеком будущем, а теперь я перейду к тем исследованиям, которые должны будут подготовить его.

Движение какой-нибудь звезды относительно наблюдателя находится между двумя предельными случаями; в первом звезда движется перпендикулярно к лучу зрения, тогда наблюдатель видит перемещение звезды по небесному своду; во втором случае звезда движется в направлении луча зрения, приближаясь или удаляясь от наблюдателя, тогда она кажется ему неподвижной на небесном своде. В общем случае движение звезды слагается из этих двух движений.

Передвижения так называемых «неподвижных звезд» по небесному своду так незначительны, что долгое время ускользали от наблюдения; их мы можем заметить только сравнивая две карты неба, снятые в различные времена, и измеряя перемены в положении звезд, происшедшие в данный промежуток времени; для большинства звезд нужны десятки лет, чтобы заметить такое передвижение. Для того чтобы из наблюдаемого перемещения по небесному своду вычислить скорость поступательного движения, т. е. скорость движения звезд в мировом пространстве, необходимо еще знать расстояние от Земли до звезды, а эта величина известна только для очень небольшого числа звезд.

Определить скорость движения звезды в направлении луча зрения, когда она приближается или удаляется от наблюдателя, не меняя своего положения на небе, с первого взгляда является почти невозможной задачей: в лучшем телескопе, при наибольшем увеличении звезда представляется нам ярко блестящей светящейся точкой, не имеющей протяжения, и потому мы не можем заметить изменения ее размеров, как мы это замечаем при приближении или удалении земных предметов. Задача эта, однако, решается при помощи спектрального анализа; тот путь, которым можно подступить к вопросу, и те результаты, которые добыты этим путем за последнее время, составляют тему моего настоящего сообщения.

Для того чтобы этот новый метод исследования природы не явился нам с первого взгляда чем-то особо стоящим, я позволю себе вкратце напомнить Вам исторический ход развития спектрального анализа и его применения к спектроскопии неба, напомнить ту сложную и разностороннюю работу человеческой мысли, которая предшествовала новому завоеванию в безграничном звездном мире.

Основатель спектральных исследований — Ньютон: он первый разложил белый свет на его составные части, на цвета радуги, заставляя

пучек света проходить через призму из прозрачного вещества; такое разложение света мы часто наблюдаем как в радуге, так и в граненых подвесках люстр. Открытие Ньютона положило основание исследованиям природы световых явлений; но прошло более ста лет упорной работы, прежде нежели Френель доказал рядом блестящих опытов, что свет есть волнообразное движение так называемого светового эфира, что свет распространяется от светящегося тела совершенно так же, как рябь по поверхности воды от упавшего камня [1]. Доказательство Френеля заключалось в том, что он смерил длину волны света (т. е. расстояние между двумя гребнями) и нашел, что цвета в спектре различаются только по длинам соответствующих им волн; так, длина волны зеленого цвета приблизительно равна одной миллионной доле пятидесяти сантиметров, длина красных волн в полтора раза больше, длина голубых в полтора раза меньше зеленых. Разность в длинах волн показывает нам, что и ритм колебаний различных цветов различен (так как скорость распространения света в воздухе для всех цветов одинакова): длинным волнам соответствуют более медленные колебания, а чем короче волна, т. е. чем данный цвет спектра дальше находится от красного и ближе к голубому концу, тем быстрее следуют друг за другом колебания. Это открытие Френеля, дающее возможность узнать изменения ритма колебания в зависимости от положения цвета в спектре, и послужило, как мы увидим дальше, необходимым подспорьем новому методу определения скоростей звезд в направлении луча зрения.

Около тридцати лет тому назад Кирхгоф и Бунзен приступили к систематическому спектроскопическому изучению света, испускаемого разными источниками; оказалось, что раскаленные твердые и жидкие тела дают непрерывный спектр, в котором находятся волны всех длин в промежутке от красного до голубого, тогда как раскаленные пары металлов (в электрической искре или в пламени) дают свет, состоящий из нескольких определенных цветов: разлагая этот свет с помощью призмы, мы найдем, что спектр его не непрерывный, а состоит из отдельных светлых линий, причем положение этих линий, т. е. длины соответствующих им волн, характеристичны для каждого металла и не зависят ни от способа испарения, ни от присутствия в его парах различных примесей; это свойство неизменности спектров металлов послужило основанием спектрального анализа: изучая спектр какого-нибудь раскаленного пара и находя между его линиями линии, совпадающие с известными линиями какого-нибудь металла, мы с уверенностью можем сказать, что этот металл находится в светящемся паре.

Второе важное открытие Кирхгофа касается закона поглощения света парами металлов: разлагая свет раскаленных паров, мы получаем, как выше сказано, спектр, состоящий из отдельных светлых линий; если мы через такой пар пропустим сильный белый свет от какого-нибудь раскаленного твердого или жидкого тела и разложим его призмой, то мы увидим,

что на том месте, где прежде были светлые линии металла, явились темные линии, т. е. отсутствие света; закон Кирхгофа выражается так: пары поглощают те цвета пропущенного света, которые они сами испускают. Разлагая спектрально свет от раскаленного источника, мы можем сразу сказать, находится ли между наблюдателем и источником какой-нибудь пар и какой именно.

Спектральный анализ дает нам возможность определять состав пара в любом от него расстоянии: мы одинаково легко и точно определяем этот состав как в том случае, когда пар находится в нашей лаборатории, так

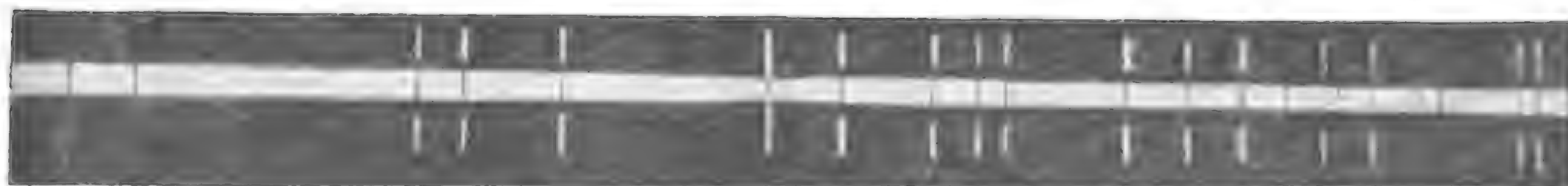


Рис. 1

и тогда, когда он неизмеримо удален от нашей солнечной системы. Этим свойством спектрального анализа воспользовался Кирхгоф: он направил спектроскоп на Солнце и на звезды, и нашел, что их спектры суть спектры поглощения паров — звезды представляют собою раскаленные добела твердые или жидкие массы, окруженные атмосферами металлических паров совершенно так же, как Земля окружена воздухом и облаками; сравнивая темные линии поглощения в звездных спектрах с спектрами различных металлов, Кирхгоф увидал, что и отдаленнейшие звезды состоят из тех же химических элементов, которые мы находим на Земле.

На приложенной фотографии (рис. 1) мы видим тот способ, которым теперь пользуются для определения химического состава звезд: на одну и ту же пластинку одновременно фотографируют спектр звезды (Сириуса) (посредине) и спектр раскаленного пара (железа) (по бокам). В спектре Сириуса мы замечаем на светлом фоне темные линии поглощения (на таблице они вышли неясно, хотя в правой половине они хорошо заметны). Сравнивая эти темные линии по их положению с светлыми линиями железа, мы находим, что они совпадают,— отсюда мы с уверенностью можем утверждать, что в атмосфере Сириуса находятся пары железа, так как мы это «видим».

Такое точное совпадение линий, какое требует закон Кирхгофа и которое оказывается при проверке закона в лаборатории, не всегда наблюдается в спектрах звезд, как это впервые заметил Гюйгенс [2] (1868 г.): темные линии в спектрах звезд «почти» совпадают с светлыми линиями металлических паров, и звездные спектры являются иногда как бы немного сдвинутыми то в одну, то в другую сторону относительно неподвижных линий металлов. Такое отступление от закона Кирхгофа, как мы

увидим сейчас, дает нам возможность определить скорость, с какой приближается или удаляется от нас наблюдаемая звезда; для этого мы воспользуемся соображениями, высказанными Допплером [3] в 1852 г., формулированными более точно Физо [4] и названными в честь первого «принципом Допплера».

Допплер показал, что на высоту звука, которую слышит наблюдатель, влияет взаимное передвижение источника звука и наблюдателя: если они сближаются, то наблюдатель слышит тон выше, если они удаляются, то ниже, чем тогда, когда оба находятся на неизменном расстоянии, несмотря на то что во всех случаях число колебаний в секунду источника осталось постоянным; это явление зависит от того, что наблюдатель в случае движения получает в секунду не то число колебаний, которое дает источник.

Действительно, предположим, что мы имеем какой-нибудь источник звука, например камертон; мы знаем, что звук передается на расстояние не моментально, а требует некоторого времени, чтобы достигнуть наблюдателя; мы знаем и скорость его распространения в воздухе: в 1 *сек* он пробегает приблизительно 330 *м*.

Пусть наш камертон дает 500 колебаний в секунду. Если он неподвижен, то каждую секунду ухо наблюдателя получает 500 колебаний.

Начнем теперь двигать камертон по направлению к наблюдателю с равномерной скоростью, например со скоростью, равной одной сотой скорости звука, т. е. $3^1/_2$ метра в секунду. В точке *К* камертон дает первое колебание, в точке *М* — последнее (500-е). Из точки *К* звук долетает до наблюдателя, находящегося в точке *Н*, через некоторое время; 500-е колебание придет однако не через целую секунду после первого, как это было бы при неподвижном камертоне, а немного раньше, так как точка *М* ближе от точки *Н*, чем точка *К*, и следовательно путь, пробегаемый звуком, короче. В течение секунды мы переместили камертон на такое расстояние, которое звук пробегает в одну сотую долю секунды (так как скорость движения камертона была в сто раз меньше скорости звука) — значит 500-е колебание достигнет наблюдателя на одну секунду раньше, чем при неподвижном камертоне; таким образом, если движение камертона продолжается, то ухо наблюдателя получит 500 колебаний в девяносто девять сотых секунды или 505 колебаний в одну секунду, т. е. на одну сотую долю тон станет выше.

Наоборот, если камертон удаляется от наблюдателя со скоростью в $3^1/_2$ метра в секунду, то 500-е колебание должно пробежать до уха наблюдателя большее расстояние и попадет на одну сотую секунды позднее, чем при неподвижном камертоне; ухо наблюдателя получит 500 колебаний в течение сто одной сотой доли секунды, или 495 колебаний в одну секунду, т. е. тон будет казаться на одну сотую ниже.

Если мы увеличим или уменьшим скорость движения нашего камертона, то соответственно увеличится или уменьшится изменение в высоте

звука. Всегда мы будем иметь соотношение

$$\frac{v}{V}=\frac{n}{N},$$

где v есть скорость приближения (или удаления) камертона, V — скорость распространения звука, n — приращение (или уменьшение) числа колебаний в одну секунду, слышанное наблюдателем (в нашем примере 5 колебаний), а N — число колебаний к мертона.

Совершенно подобное изменение высоты тона произойдет и в том случае, когда камертон будет неподвижен, а наблюдатель будет перемещаться, приближаясь к нему или удаляясь от него: после того как ухо наблюдателя получило первое колебание камертона, оно перемещается в какую-нибудь точку, до которой звук доходит раньше (или позднее), чем до той точки, в которой оно находилось раньше; число колебаний, получаемых в одну секунду, будет больше (или меньше), наблюдателю тон кажется выше (или ниже); и к этому случаю приложима написанная выше формула, которая остается верной и в том случае, когда как камертон, так и наблюдатель двигаются; в этом случае v представляет собою скорость их взаимного приближения (или удаления).

В том случае, когда наблюдатель или камертон двигаются с некоторой скоростью в направлении, перпендикулярном их линии соединения, то расстояния между ними не меняются, звук пробегает его в равные времена — высота тона наблюдателю кажется без изменения; в этом случае скорость взаимного приближения v равна нулю и, следовательно, приращение числа колебаний n тоже равно нулю.

Те же самые соображения, которые мы прилагали к случаю взаимного перемещения камертона и наблюдателя, приложимы и для случая взаимного перемещения источника света и наблюдателя: когда наблюдатель приближается с известной быстротой к источнику света, то ритм световых колебаний, получаемых его глазом, делается быстрее; разлагая полученный свет при помощи спектроскопа, он увидит, что все светлые линии раскаленных металлов передвинулись к голубому концу спектра; но не только светлые полосы раскаленных металлов меняют свои места, а и темные полосы поглощения перемещаются в ту же сторону на одинаковую величину. В том случае, когда расстояние между наблюдателем и источником света увеличивается с достаточной быстротою, все линии спектра смещаются к красному концу его. Формула, связывающая между собою скорость взаимного сближения наблюдателя и источника света с приращением числа колебаний света, тождественна с указанной выше формулой, причем, конечно, в этом случае V обозначает скорость распространения света.

Результаты, добытые Допплером теоретическим путем, были потом проверены наблюдениями. Проверить приложимость принципа Допплера для движущегося источника звука не представило особых трудностей,

так как скорость распространения звука — 330 *м/сек* — не чрезмерно велика сравнительно со скоростями, которые мы при опытах можем дать источнику звука. Опыт производится следующим образом: около полотна железной дороги помещался наблюдатель и замечал, что высота звука свистка быстро идущего паровоза меняется в момент, когда паровоз проходит мимо наблюдателя — звук переходит из высокого в низкий оттого, что свисток сначала приближается, потом удаляется; вероятно, многим из Вас удавалось замечать это явление при путешествии по железным дорогам. Опыты показали, что наблюдаемое понижение звука свистка в зависимости от скорости паровоза вполне совпадает с вычисленным по указанной формуле.

Для случая движения светящегося тела опытная проверка принципа Допплера является очень трудной задачей, так как скорость распространения света огромна (она равна 300 000 *км/сек*), и сравнительно с нею те скорости, которые мы можем сообщать нашим приборам, ничтожны: так, скорость пушечного ядра не больше двух миллионных долей скорости света; помещая светящееся тело на ядре, двигающемся в направлении луча зрения, мы получили бы смещение спектральных линий на две миллионных доли длины волны, величину, которую мы едва в состоянии заметить при помощи самых сильных спектроскопов. Приступая к поверке принципа Допплера, Фогель [5], которому астрофизика так много обязана приложением этого принципа, воспользовался скоростями на поверхности Солнца: известно, из движения пятен по солнечной поверхности, что Солнце обращается вокруг своей оси в 26 дней, и известен радиус Солнца; отсюда легко вычислить, с какой скоростью приближается к нам или удаляется от нас точка солнечного экватора, появляясь с одной стороны диска или исчезая с другой; эта скорость будет равна линейной скорости движения солнечного экватора — около двух километров в секунду; сравнивая спектры приближающегося и удаляющегося краев Солнца, Фогель нашел, что линии их сдвинуты относительно друг друга на величину, соответствующую, по принципу Допплера, линейной скорости солнечного экватора.

Этими исследованиями Фогель доказал [6], что принцип Допплера имеет место для передвижения световых источников, что мы можем, зная скорость движения источника в направлении луча зрения, предвычислить величину смещения спектральных линий; мы можем решить и более интересную обратную задачу: по известной из наблюдений величине сдвижения спектральных линий вычислить скорость приближения или удаления светящегося источника: сравнивая спектр звезды со спектром неподвижного источника одинакового химического состава и измеряя смещение линий, мы можем также легко определить скорость приближения к нам или удалений от нас звезды, находящейся на неизмеримом расстоянии, как мы определяем скорость быстро мелькающих мимо нас вагонов встречного поезда из интервала понижения тона его свистка.

Этот простой по принципу способ определения движения звезд представляет собою огромные практические трудности, на преодоление которых Фогель потратил более пятнадцати лет упорной работы.

Скорости движения звезд в направлении луча зрения, как показали наблюдения, в большинстве случаев не превосходят одной десятитысячной доли скорости света; поэтому приходится измерять перемещение линий на величину, соответствующую изменению волны света на одну десятитысячную долю; для этого является необходимость в очень сильном растягивании спектра, а чем длиннее спектр, тем меньше его яркость, так как то же количество света распределяется на большом протяжении. Для того чтобы увидать спектр звезды, поступают следующим образом: спектроскоп привинчивают к астрономической трубе и с помощью большого увеличительного стекла (объектива) концентрируют свет звезды на щель спектроскопа — тогда виден очень слабый, узкий и длинный спектр; в приборах с большой рассеивающей силой, с помощью которых приходится измерять сдвижение линий, спектр так слаб, что требуется значительный навык и продолжительное всматривание, для того чтобы увидать присутствие самого спектра, не говоря уже о том, чтобы разобрать находящиеся в нем линии. Но еще больше затрудняет наблюдение то красивое явление, которое мы часто наблюдаем в морозные дни при неспокойных верхних слоях атмосферы — мерцание звезд; при сильном увеличении астрономической трубы соответственно увеличивается это мерцание, выражающееся в спектральном приборе дрожанием спектра в направлении его ширины.

Слабость спектра и его дрожание настолько затрудняют и утомляют наблюдателя, что иногда в течение нескольких часов он не может разобрать линий спектра, не говоря уже об измерении их сдвижения; в десятитысячных долях волны всегда являлись ошибки, и потому измерить скорость движения звезд было немыслимо.

Фогелю пришла счастливая идея воспользоваться для этой цели фотографией [7] и благодаря этому приему недостижимое и невозможное стало возможным, доступным. Человеческий глаз делается чувствителен к свету только, если свет имеет определенную силу — при меньшей силе света глаз ничего не в состоянии отличить, как долго бы мы ни присматривались; фотографическая пластинка не имеет такой предельной чувствительности: если мы уменьшим силу света, падающего на фотографическую пластинку, в десять раз, то стоит нам только в десять раз увеличить время экспозиции, чтобы отчетливость снимка была такова же, как и в первом случае [8],— фотографическая пластинка суммирует полученные впечатления; дрожание спектра, которое даже при достаточной силе света очень сильно утомляет наблюдателя и делает измерение невозможным, не оказывает никакого невыгодного действия на пластинку: спектр делается немного шире, чем при спокойном состоянии атмосферы, но на резкость линий это не имеет влияния.

Применяя фотографический метод, можно измерять сдвижения линий с точностью до одной стотысячной длины волны, т. е. определять скорость движения звезд в направлении луча зрения с точностью до трех километров в секунду.

На рис. 2 изображено сдвижение спектра самой яркой звезды в созвездии Возничего — Капеллы — в. различные времена года по снимкам, сделанным Фогелем; для того чтобы видеть величину сдвижения относительно неподвижной метки, на ту же пластинку одновременно была снята линия водорода, раскаленного электрической искрой. Как видно, в октябре светлая линия водорода гейслеровой трубки совпадает с темной и широкой полосой поглощения в спектре Капеллы; это доказывает, что в атмосфере звезды находится водород в значительном количестве, и так как искусственная линия водорода почти совершенно совпадает с линией поглощения, то и скорость взаимного перемещения Земли и звезды почти равна нулю.

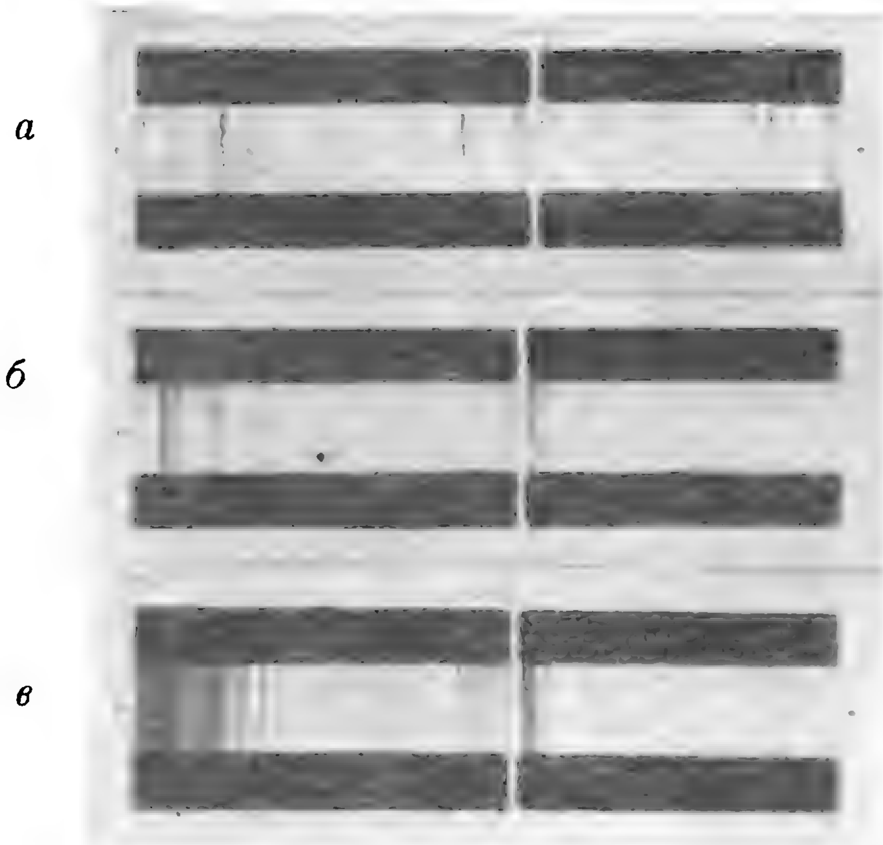


Рис. 2

а — октябрь; б — декабрь; в — март

В декабре мы замечаем, что темная линия поглощения заметно подалась вправо относительно неподвижной светлой линии водорода к красному концу спектра; это показывает, что взаимное расстояние между Землей и звездой увеличивается.

Наконец, в марте это сдвижение вправо еще больше; значит и скорость, с какой Земля и звезда удаляются друг от друга, стала еще значительнее. Мы можем «смерить» эту скорость, если имеем в виду, что часть спектра, снятого на пластинке, лежит в интервале длины волн от 405 до 416 миллионных долей миллиметра, а что длина волны водорода в тех же единицах равна 410; сдвижение в марте составляет около одной десятой доли расстояния линии водорода от края, т. е. составляет 0,6 единицы; 0,6 относится к 410 приблизительно так же, как 45 *км* к 300 000 *км* (скорости света). Мы находим, что в марте Земля и Капелла удаляются друг от друга со скоростью 45 *км/сек*.

Из этих измеренных скоростей звезды относительно Земли мы можем вычислить скорость движения звезды относительно Солнца: для этого надо только принять во внимание, что Земля движется кругом Солнца со значительной неизменною скоростью (30 *км/сек*), и что скорость Земли относительно звезды изменяется в зависимости от положения Земли на орбите совершенно так же, как меняются скорости лошади, бегающей по

кругу, относительно наблюдателя, находящегося вне этого круга: приближение и удаление сменяются периодически.

В следующей таблице приведены скорости движения Капеллы, найденные в разные времена. В первом столбце записаны дни наблюдения; во втором — скорость движения Капеллы относительно Земли, найденная из измерения сдвижения линий спектра, причем знак (+) соответствует взаимному удалению, а знак (—) приближению; в третьем столбце находится вычисленная скорость Земли относительно звезды в зависимости от движения первой по орбите, и, наконец, в четвертом находится истинная скорость удаления Капеллы от Солнца.

Дата	Наблюдаемая скорость, *км/сек*	Скорость Земли, *км/сек*	Скорость Капеллы относительно Солнца, *км/сек*
1888. Октябрь 22	+ 4	—21	+25
» 24	+ 5	—20	+25
» 25	+ 5	—20	+25
» 28	+ 4	—19	+23
Ноябрь 9	+11	—14	+25
Декабрь 1	+19	— 5	+24
» 13	+24	+ 1	+23
1889. Январь 2	+33	+11	+22
Февраль 5	+53	+23	+30
Март 6	+55	+27	+28
		Среднее . . .	+25

Из этой таблицы видно, что скорость удаления Капеллы от нашей солнечной системы, в пределах погрешности наблюдений, постоянна и по своей величине немного меньше скорости, с которой Земля движется по орбите вокруг Солнца.

Я не буду останавливаться на результатах, добытых раньше Гюйгенсом и Гринвичской обсерваторией с помощью мало точного прямого наблюдения спектров, и приведу только результаты измерений с помощью фотографического метода, добытые под руководством Фогеля (в Потсдаме, близ Берлина); как и выше, знак (+) обозначает удаление, а знак (—) приближение к Солнцу.

Здесь звезд немного, всего 22 — число, ничтожное сравнительно с числом видимых звезд, но, тем не менее, результаты представляют собой первостепенное значение: они показывают, что все изученные звезды не неподвижны относительно Солнца, а перемещаются, приближаясь или удаляясь от него с различными скоростями, и что эти скорости того же

порядка, как и скорости движения планет по орбитам вокруг Солнца. Перед исследователем открывается огромное поле для изучения движения материи всей Вселенной: соединяя скорости движения звезд в направлении луча зрения (получаемые при помощи спектроскопа) с их движением в перпендикулярном направлении (по вычислениям из передвижения по небесному своду), можно получить скорости и направления движений звезд в бесконечном мировом пространстве.

Звезда	Скорость, *км/сек*	Звезда	Скорость *км/сек*
α Cassiopeae	—15	α Canis minoris (Procyon)	—11
β Andromedae (Mirach)	+12	β Geminorum (Pollux)	+1
α Ursae minoris (Polarie)	—27	γ Leonis	—39
γ Andromedae (Alamak)	—12	α Ursae majoris	—12
α Arietis	—14	α Bootis (Arctur)	—8
α Persei (Algenib)	—11	ξ Bootis	—17
α Tauri (Aldebaran)	+49	β Ursae minoris	+14
α Aurigae (Capella)	+25	β Herculis	—35
α Orionis (Beteigeuze)	+14	γ Cygni	—6
γ Geminorum	—15	α Cygni	—6
α Canis majoris (Syrius)	—12	ξ Pegasi	+8

Но не только для решения этого глубокого вопроса спектроскоп является могущественным орудием: при его помощи мы можем узнать и много интересного из внутренней жизни отдаленнейших звездных систем, узнать особенности, которые мы не могли бы подметить при помощи самых сильных телескопов. Такой случай представляет собою переменная звезда Алголь (α Persei), яркость которой периодически меняется в течение 2 дней и 21 часа: в течение 2 дней 12 часов яркость ее остается постоянной, а потом в течение $4^1/_2$ часов убывает до половинной величины, чтобы в течение следующих $4^1/_2$ часов достигнуть прежней яркости. Было высказано предположение, что вокруг светящейся звезды вращается темный спутник значительной величины, который при известном положении частью загораживает собою свет звезды. Фогель и Шейнер предприняли спектроскопическое исследование Алголя, полагая, что и светящаяся звезда в свою очередь вращается вокруг темного спутника и поэтому периодически то приближается к нам, то удаляется от нас; спектры, снятые в различные времена, вполне подтвердили это предположение, представляя собою совершенно такое же переменное сдвижение линий, какое мы видели на таблице в спектре Капеллы, благодаря обращению Земли; только в случае Алголя период был не годовой, а трехдневный. Но спектроскоп не только показал нам существование вращения Алголя около спутника — он дал гораздо больше: по сдвижению линий было найдено, что скорость Алголя по орбите равняется 42 *км/сек* и так как известно время обращения (2 дня 21 час), то отсюда легко вычислить длину пройденного

пути и расстояния Алголя от центра вращения; зная эти расстояния, можно вычислить ту силу тяготения, которая необходима, чтобы удержать звезду на ее орбите, т. е. вычислить величины притягивающей массы. Пользуясь фотометрическими измерениями и делая некоторые упрощающие вычисления предположения, Фогель и Шейнер нашли:

Диаметр светлой звезды	1 700 000	*км*
Диаметр темного спутника	1 330 000	»
Расстояние их центров	5 180 000	»
Скорость по орбите Алголя	42	*км/сек*
Скорость спутника	89	»
Скорость приближения всей системы к Солнцу . . .	4	»

Массы тел: $\frac{4}{9}$ и $\frac{2}{9}$ массы Солнца

Таким образом, у нас явилась возможность определить массу звезды; мы нашли, что она мало разнится от массы Солнца; этим неоспоримо доказывается, что звезды суть такие же солнца, как наше, и имеют своих спутников, свои планеты: наша солнечная система только одна из бесчисленных звезд мирового пространства.

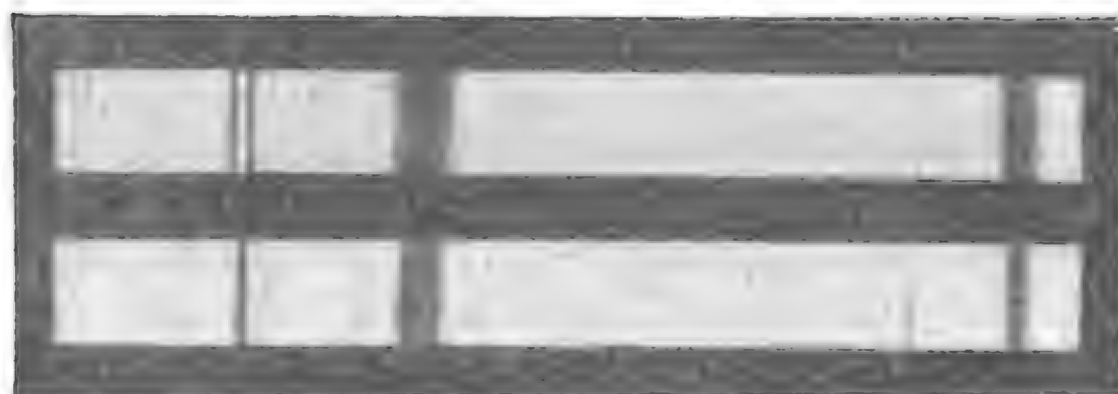


Рис. 3

Таким же образом была исследована другая переменная звезда Спика (α Virginis) и определены элементы, ее составляющие. Еще больший интерес представляет собою открытие Пиккеринга, который нашел системы, состоящие из двух солнц, вращающихся друг около друга в плоскости, проходящей через луч зрения; в известные моменты, когда оба солнца двигаются перпендикулярно лучу зрения (например, одно вправо, другое влево), одинаковые линии их спектров совпадают, тогда как в течение следующей четверти оборота одно солнце двигается, приближаясь к нам, а другое,— удаляясь от нас, отчего линии спектра первого из них перемещаются к голубому концу, а линии другого — к красному концу спектра; мы находим, что каждая линия спектра раздваивается. Пример спектра такой интересной системы (β Aurigae) мы имеем на рис. 3.

Вот в кратких словах те успехи изучения движения звезд, о которых я хотел сообщить сегодня: перед нами являются результаты, о которых мы пять лет тому назад не решились бы и мечтать. И явились они не сразу, не благодаря счастливой случайности, а благодаря упорному разностороннему труду во всех направлениях человеческого знания: не только Ньютон, Френель, Кирхгоф, Допплер, Гюйгенс и Фогель подготовили эти новые открытия — тысячи тружеников, имена которых известны лишь узкому кружку специалистов или уже забыты, прямо или косвенно внесли свою лепту.

Те результаты, о которых мы слышали,— только первые, блистательно увенчавшиеся попытки применения нового метода, при помощи которого мы можем в ночной тишине заставить говорить природу: волны звездного света будут рассказывать нам о сокровенной жизни иных, недосягаемых миров и раскрывать нам тайны мироздания.

Что даст нам это новое изучение? Где границы исследования природы? — Вот как на это отвечает Полонский:

Царство науки не знает предела,—
Всюду следы ее вечных побед,
Разума слово и дело,
Сила и свет!

4. АВГУСТ КУНДТ[1]

Позвольте мне, М. Г., в качестве ученика покойного Августа Кундта, исполнить грустную обязанность в немногих словах напомнить Вам жизнь и труды нашего знаменитого сочлена и попытаться очертить его влияние на прогресс физики как ученого и как учителя.

Август Кундт родился 18 (6) ноября 1839 г. Вся жизнь его, как он сам не раз говаривал, сложилась счастливо, ничто не нарушало ее ровного течения, всегда перед ним было открыто широкое поприще деятельности, где талант его проявлялся во всей своей силе, и крупными событиями его жизни являлись лишь его собственные работы.

Решающее значение в жизни Кундта имело его пребывание в Берлинском университете в начале шестидесятых годов, где он слушал знаменитого Магнуса [1] и сперва как студент, а потом в качестве ассистента работал в частной лаборатории своего учителя. В этой лаборатории впервые блеснул его необыкновенный экспериментаторский талант: ряд проведенных здесь работ, замечательных как по ясности постановки вопроса, так и по изяществу выполнения привел его к классическим исследованиям скорости звука в твердых телах и в газах при помощи «кундтовых фигур».

Вот в чем по-существу состоит этот способ (рис. 1): при возбуждении продольных колебаний в стержне S, который зажат посредине, рождается сильный высокий звук, образующий стоячие волны в стеклянной трубке R; чтобы сделать эти последние видимыми, Кундт насыпал в трубку легкого порошка (ликоподия), который, собираясь в узлах, давал возможность смерить длину волны в данном газе; отношения длины волны в разных газах и отношения их к длинам стержней дают отношение скоростей звука как в газах, так и в твердых телах. Особое преимущество этого метода заключается, помимо его простоты, еще и в том, что для ис-

[1] Читано в заседании Отделения физических наук Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии 30 сентября 1894 г.

следований достаточно пользоваться небольшими объемами газов и короткими стержнями твердых тел; благодаря этому им впоследствии многократно пользовались другие ученые (Cohen [2], Dvořak [3], Kayser [4], Neesen [5], Столетов, Strecker [6], Warburg [7] и др.), а также и сам Кундт (в деталях слегка изменив его) для определения скорости звука в парах ртути.

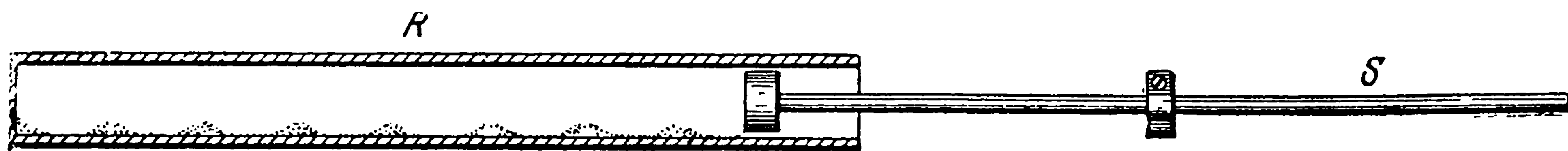


Рис. 1

Эти «кундтовы фигуры», которые теперь вошли в элементарные курсы физики, при своем появлении сразу обратили внимание физиков на талантливого молодого ученого, в связи с дальнейшими работами которого они сделали имя Кундта одним из популярнейших в акустике.

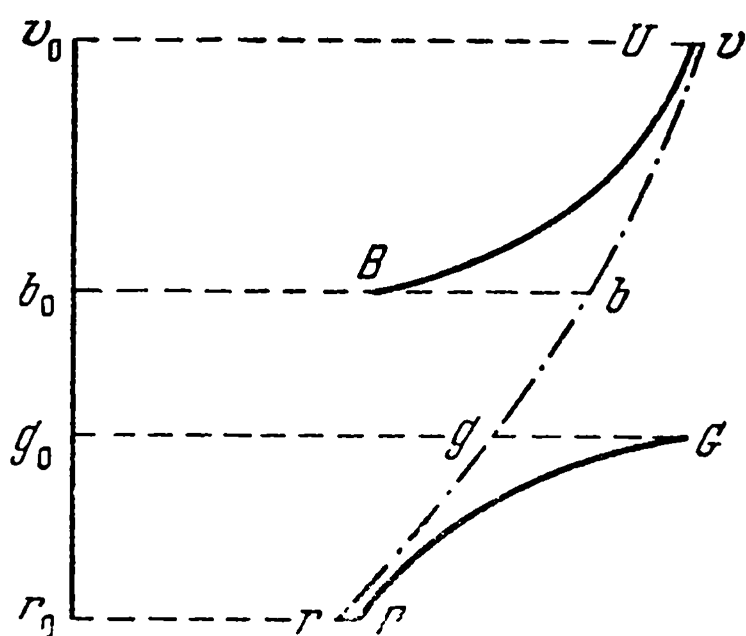


Рис. 2

Получив место профессора в Цюрихе, Кундт два года прожил в Швейцарии и потом перешел профессором в Вюрцбургский университет (1870). Здесь возникли и были окончены им исследования по аномальной дисперсии света, которые обессмертили имя Кундта в оптике. В них сказались все особенности его таланта: основываясь на единичных случаях, где были замечены отступления от обычных законов дисперсии (Le Roux [8], Christiansen [9]), Кундт увидал, что перед ним явление первостепенной важности, общее для тел, поглощающих свет, и способом, известным в физике под названием «кундтовых кривых дисперсии», он нашел, что аномальная дисперсия имеет место для всех окрашенных сред.

Вот какими простыми средствами воспользовался Кундт для своих исследований: он взял спектрометр, заменил щель малым отверстием и, поместив перед коллиматором стеклянную призму с горизонтальным преломляющим ребром, получил узкий вертикальный спектр (рис. 2) от красного r_0 до фиолетового v_0 конца; помещая на столике спектрометра полую призму с испытуемой жидкостью, он мог сразу видеть весь ход дисперсии; для всех прозрачных тел отклонение (показатель преломления) растет равномерно от красного конца спектра к фиолетовому (пунктирная кривая $rgbv$), и голубой свет b больше отклонен, чем желтый g;



Проф. А. Кундт (1839—1894)

но всякий раз, когда преломляющее тело подкрашено и поглощает какой-нибудь цвет спектра (на рис. 2 — зеленый), то изменение показателя преломления сильно возрастает с приближением к полосе поглощения, и потому лучи, лежащие ближе к красному концу (желтые *G*), могут быть более отклонены, чем лежащие ближе к фиолетовому (голубые *B*), т. е. не так, как в до тех пор известной «нормальной» дисперсии.

Эти работы в корне изменили взгляды на явление преломления света и послужили основанием для целого ряда теоретических изысканий (v. Helmholtz, Ketteler [10], Lommel [11], Sellmeier [12], Voigt [13] и др.), которые выяснили влияние материальных частичек среды на проходящий через нее луч,—другими словами, послужили основанием современной оптике; в литературе легко проследить то значительное влияние, которое имело открытие Кундта на все последующие работы по оптике.

После непродолжительной деятельности в Вюрцбурге Кундта ожидала огромная задача — создать физический институт нового Страсбургского университета и он создал не только лучший в мире Кундтовский физический институт, но и основал в нем ту интернациональную Кундтовскую школу физиков, ученики которой рассеяны теперь по всему земному шару. С присущим ему талантом не только схватывать общие черты задачи, но и разрабатывать изящнейшим образом ее детали, Кундт приступил к составлению плана здания: он задался целью построить институт, удовлетворяющий всем требованиям научного комфорта, как для лекционных и педагогических целей, так и для всевозможных научных исследований, предвидя самые разнообразные условия будущих работ; весь план был выполнен Кундтом собственноручно, и вся стройка проводилась под постоянным его наблюдением. Не только описание, но даже и осмотр Страсбургского института (см. рис. 6), не может дать об нем настоящего понятия: надо поработать в нем, чтобы оценить значение всех тех приспособлений, в которых увековечились обдуманность и проницательность великого строителя.

Вряд ли возможно поставить такое требование, которому не удовлетворял бы Страсбургский институт: обширная удобная аудитория со всеми приспособлениями для демонстраций, особая малая аудитория для математических курсов, богатый кабинет, просторная лаборатория для начинающих, могущая вместить до пятидесяти человек, и, наконец, для занимающихся самостоятельными исследованиями — целый ряд комнат со всеми удобствами: везде каменные консоли и плиты, тяги, вода, газ и электричество, огромные залы, широкие длинные коридоры для работ, требующих много места, комнаты для магнитных и оптических исследований, башня в 30 *м* для опытов с манометрами и маятниками, подземное помещение для постоянных температур, библиотека, химическая лаборатория, механическая мастерская, газовый двигатель с динамомашиной, весовая, ртутная, а также и фотографические комнаты, кладовые — все это соединено в одно целое, замечательно удобно расположено и снабже-

но всеми добавочными приспособлениями, которые только могут оказаться необходимыми для самых разнообразных работ.

Создание Страсбургского института, который вот уже пятнадцать лет служит прототипом для физических институтов, аудиторий и лабораторий всех стран, принадлежит к числу крупнейших научных заслуг Кундта: он впервые во всей полноте выяснил те наивыгоднейшие внешние условия, при которых надо учить и работать современному физику.

Как только план института был выработан и началась постройка его, Кундт поспешил воспользоваться физическим кабинетом страсбургской академии, чтобы продолжать свои экспериментальные исследования. В начале семидесятых годов кинетическая теория газов привлекла внимание всех физиков и открывала им казавшийся недоступным мир молекул; теория предсказывала парадоксальные с первого взгляда явления, и опыт блистательно подтверждал эти догадки.

Одним из таких парадоксов, особенно заинтересовавших Кундта, был закон, теоретически найденный Максвеллом, что внутреннее трение и теплопроводность газа не зависят от его давления, а обусловливаются исключительно его химической природой и температурой,— закон, который для предельно малых давлений приводит к невероятному предположению. Кундт задался целью проследить закон в возможно широких пределах давлений, и ему в сообществе с Варбургом [7] удалось показать, что в пределах от одной целой до одной тысячной доли атмосферы закон Максвелла имеет место, но при бо̀льших разрежениях замечаются резкие отступления, благодаря тому, что средние пути молекул становятся соизмеримыми с размерами измеряющих приборов. Ряд исследователей (Graetz [14], Pulluj [15], Winkelmann [16] и др.) впоследствии воспользовались их остроумными методами.

Другим интересным вопросом кинетической теории газов, которым занялся Кундт, также в сообществе с Варбургом, было положение, что частички одноатомных газов обладают только энергией поступательного движения и не имеют внутренней энергии вращательного, свойственного многоатомным частичкам; эта особенность в резкой форме сказывается в скорости звука в подобном газе. Огромное большинство газов и паров двух- или многоатомно; исключением из них является одноатомный пар ртути, на котором Кундт и решил проверить выводы кинетической теории газов, измеряя в нем скорость звука.

Для решения этой трудной задачи Кундт воспользовался, как я уже упоминал, методой «кундтовых фигур», и исследователи нашли скорость звука вполне согласной с предсказанной теоретически.

Описанные работы Кундта и Варбурга принадлежат к числу классических в области кинетической теории газов, изящно иллюстрируя основные ее положения и смелые заключения; они в значительной степени способствовали успеху кинетической теории.

Переходя к работам Кундта, которые он выполнил в своем новом институте, я должен ограничиться только теми из них, которые указывали бы в общих чертах на направление его исследований и были выполнены им лично, совершенно не касаясь всех многочисленных работ его учеников, сделанных на предложенные Кундтом темы и по его плану.

Из целого ряда работ Кундта надо упомянуть, помимо его исследования влияния растворителя на оптические свойства (поглощение) растворимого тела — вопроса, которому, по всем данным, суждено играть выдающуюся роль в ближайшем будущем оптики, еще до его исследования кристаллооптических явлений в некристаллических телах; этот последний вопрос заинтересовал Кундта еще в самом начале его научной деятельности в лаборатории Магнуса и впоследствии привел его к интересному открытию двойного преломления в жидкостях. Мы знаем, что при изменении формы твердого тела обнаруживаются внутренние силы, противодействующие деформации, сказывающиеся в прозрачных телах явлением двойного преломления; в телах полутвердых (например, в канадском бальзаме) эти внутренние силы, препятствующие деформации, и связанное с ними двойное преломление исчезают. Для жидкостей мы привыкли предполагать полное отсутствие упругой деформации; но Кундт показал экспериментально, что это неверно, что разница для твердых тел и для жидкостей лишь количественная, а не качественная. Так как эти силы в жидкостях слишком быстро приходят в равновесие, то Кундт решил непрерывно деформировать жидкость; он воспользовался следующим приспособлением (рис. 3): в сосуд G со стеклянными стенками наливалась испытуемая жидкость, и помещались два концентрических цилиндра C_1 и C_2, из которых внешний был неподвижен, а внутренний мог вращаться около оси и приводился в движение двигателем; прибор помещался между двумя скрещенными николями, так что свет шел параллельно оси вращения, и покуда цилиндр C_2 был неподвижен, поле оставалось темным; но лишь только цилиндр начинал вращаться с достаточной скоростью и каждый элемент жидкости, находящейся между цилиндрами и прилипающей как к неподвижному, так и к вращающемуся цилиндру, начинал беспрерывно деформироваться, в поле появлялся светлый крест — жидкость стала двупреломляющей, проявляя силы упругой деформации; дальнейшие исследования (Де Метц [17]) подробнее выяснили ряд других особенностей.

По-существу к тому же циклу работ о кристаллах принадлежит и небольшое, весьма элегантное по приему, исследование электризации кристаллов. Как известно, кристаллы обладают свойством при деформациях, происходящих от механических сил или нагреваний, электризоваться на поверхности. Исследование распределения получаемых электрических зарядов, необходимое для выяснения связи электризации с кристаллической формой тела, представляло собою массу затруднений и во многих случаях было даже недоступно. Все эти затруднения Кундт устранил са-

мым простым и всем давно известным способом: он обсыпал электризовавшийся кристалл тем порошком из серы и сурьмы, который употребляют для лихтенберговых фигур,— и сразу получал всю картину распределения электричества на данном кристалле. На рис. 4 изображена электризация при нагревании пластинки кварца, вырезанной перпендикулярно оси; в тех случаях, когда в кристалле есть сращения, получаемая фигура несравненно более сложна и представляет собою целую сеть красных и желтых жилок. Этим способом впоследствии пользовались многие исследователи (Blasius [18], Czermak [19], Röntgen, Warburg [7] и др.).

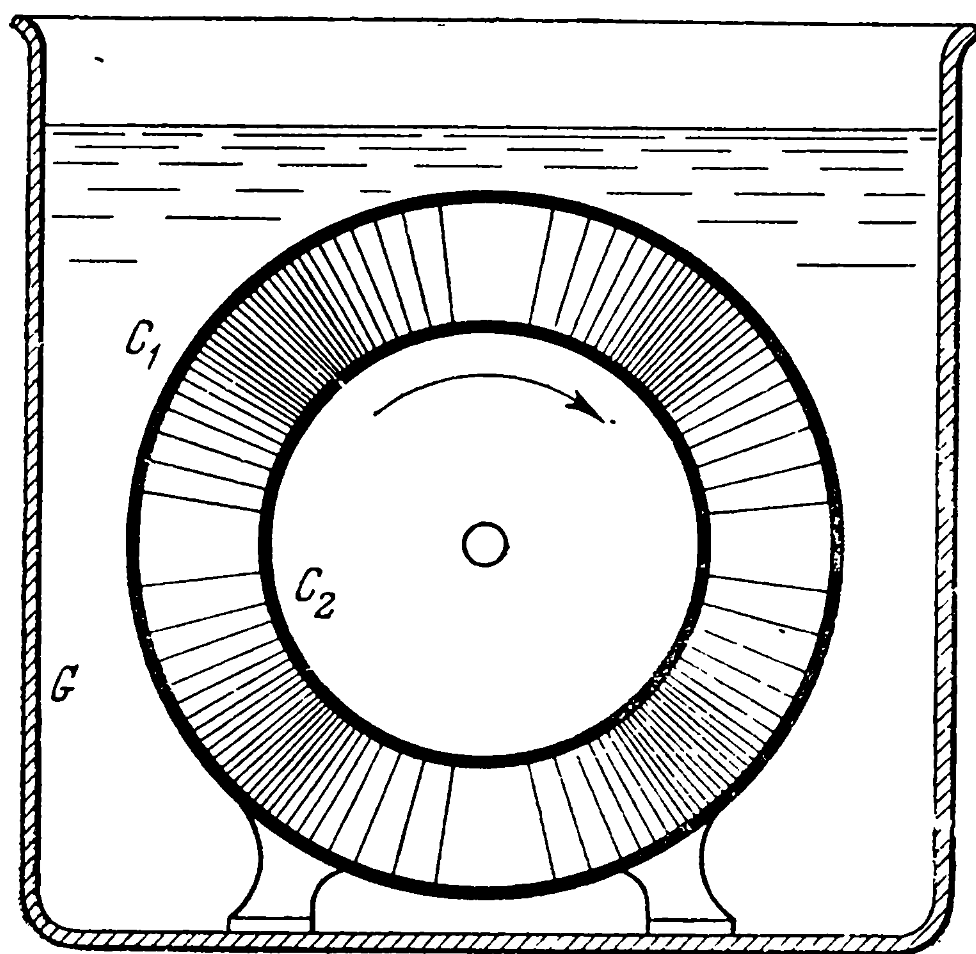
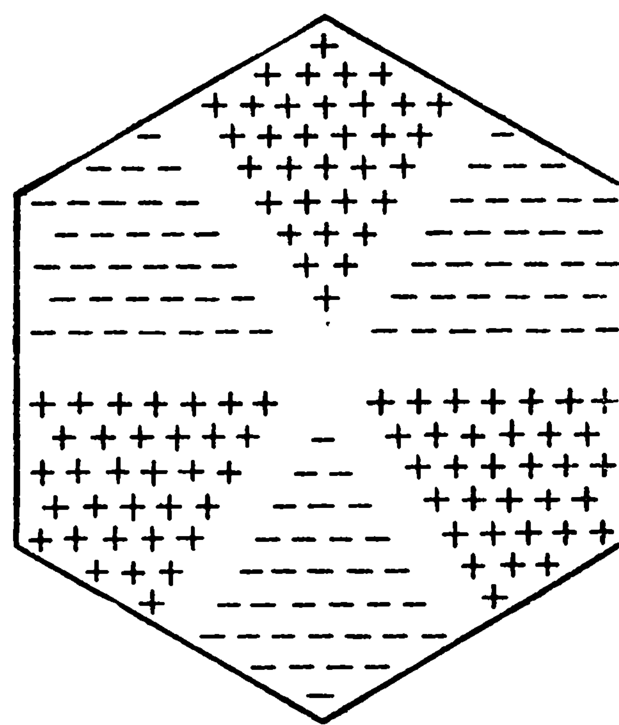


Рис. 3


Рис. 4

Начиная с 1885 г. работы Кундта главным образом лежат в области металлической оптики, и результаты, добытые здесь, поражают не только простотою и глубиною мысли, но и теми огромными трудностями, победить которые мог только Кундт. Вот как однажды в разговоре он сам формулировал свою мысль: все явления металлической оптики обусловливаются проникновением света на очень небольшую глубину под поверхность металла; но мы ничего не можем сказать, какими свойствами обладает луч, уже прошедший часть такого слоя — вот почему интересно изолировать эту поверхность (полупрозрачную пленку металла) и изучить действие ее на свет в отдельности. Технические способы приготовления таких листов представляют собою огромные трудности: вальцование, химическое осаждение и распыление катода применимы не всегда и не для всех металлов, и потому Кундт, после целого ряда опытов, остановился на придуманном им гальванопластическом способе: стекло, покрытое тончайшим, совершенно

прозрачным слоем металлической платины, он помещал в гальванопластическую ванну, осаждал на него испытуемый металл слоем любой толщины — препарат был готов. Этим способом Кундт воспользовался для своих дальнейших работ.

Еще значительно раньше интерес Кундта привлекло явление вращения плоскости поляризации в магнитном поле; работы его в этом направлении начались сделанным им в сообществе с Рентгеном открытием той вращательной способности газов, которую тщетно искал великий Фарадей [20]; дальнейшие работы над вращением плоскости поляризации при отражении от магнитных металлов (явление Керра [21]) навели его на мысль исследовать свойства луча, проходящего поверхностную пленку: он приготовил по своему способу прозрачную пленку железа и, поместив ее в магнитном поле, мог наблюдать вращение плоскости поляризации проходящего света, несмотря на ничтожную толщину слоя; это вращение оказалось огромным; в сильном магнитном поле оно на единицу длины в 1000 раз больше естественного вращения в кварце. Это явление, которому присвоено теперь название «явления Кундта», послужило краеугольным камнем современной электрооптики и вызвало целый ряд экспериментальных и теоретических исследований в этой области (du Bois [22], Drude [23], Гольдгаммер, Sissingh [24], Zeemann [25]).

Способ гальванопластического приготовления прозрачных металлических слоев может давать, при уменье им пользоваться, препараты, вполне годные для тонких оптических работ, но те платинированные стекла, которые можно достать в продаже, были дороги и далеко не удовлетворяли необходимым требованиям; приступая к ряду дальнейших исследований, Кундт увидал необходимость или оставить задуманные работы, или самому заняться изготовлением их; он предпочел последнее. Так как приготовление даже столь несовершенных стекол продавцы держали в секрете, то Кундт принужден был начать работу без каких-либо указаний и сам изобретал платинирование стекла; более года он не отходил от обжигательной печки и искал, пробуя всевозможные вещества, такого растворителя для хлористой платины, который бы при сравнительно низкой температуре давал равномерный, хорошо пристающий к стеклу осадок металла, и, наконец, после 2000 обжиганий он стал получать те превосходно платинированные стекла, которые принято называть «зеркалами Кундта». Это чисто техническая работа знаменитого ученого, пожалуй, более, чем всякая другая, характеризует отношение его к тем затруднениям, которые он встречал на пути своих исследований.

Последняя работа, которую Кундт сделал в Страсбурге, была достойным венцом его блестящей деятельности не только по своему фундаментальному значению для оптики, но и по своему выполнению, в котором в полной силе сказался экспериментаторский гений Кундта, гений, не знающий непреодолимых трудностей: это было определение показателя преломления света в металлах. Кундт измерил этот показатель самым элемен-

тарным способом — отклонением пучка лучей призмой из испытуемого вещества; с первого взгляда для металлов такой способ кажется непонятным, но он является приложимым для «кундтовских призм», для тех маленьких призм с весьма малым преломляющим углом (меньше минуты), которые так тонки, что пропускают достаточное для измерений количество света. Кундт получал их своим гальванопластическим способом (рис. 6): положив горизонтально платинированное стекло в ванну и расположив перпендикулярно к нему пластинку из испытуемого металла M, он получал при электролизе слой в виде двойного клина (на рис. 5 он изображен схематически) [1], и тогда каждый из этих клиньев служит отдельною

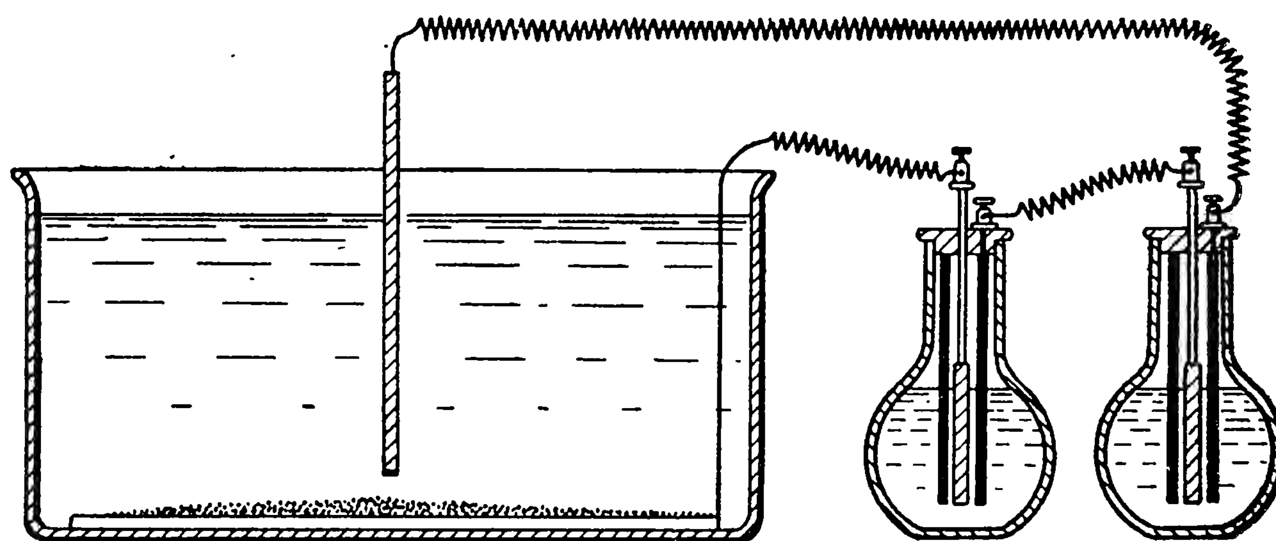


Рис. 5

призмою; помещая эти призмы на столик спектрометра, он определял его преломляющие углы, как это делают обыкновенно, способом Гаусса, а потом измерял отклонение луча, и так находил показатель преломления. С появлением этой работы Кундта начинается новая эпоха в области металлической оптики, так как показатель преломления металла играет первенствующую роль во всех ее вопросах: целый ряд дальнейших исследований (du Bois, Drude, Shee [26], Rubens [27], и др.) отмечают это новое движение.

В 1888 г. Кундт принял лестное предложение Берлинского университета быть преемником Гельмгольца в Берлинском физическом институте, и навсегда покинул Страсбург.

И в Берлине, несмотря на массу работы, которая ожидала его в новом институте, несмотря на тяготившую его столичную жизнь, он неутомимо продолжал свои научные исследования, первое время особенно занимаясь показателями преломления металлов; не имея возможности спокойно работать днем, он работал вечером и ночью, обыкновенно часов до трех — и так изо дня в день.

[1] В большинстве случаев сама ванна состояла из капли соляного раствора, который удерживался капиллярными силами между платинированным стеклом и металлической пластинкой.

Последнею его работою было исследование «явления Холла» [27] в связи с «явлением Кундта»; оно является новым крупным вкладом в исследовании внутренней связи оптических и электрических явлений.

Чрезмерная работа и застарелая болезнь сердца подорвали здоровье Кундта; уступая настояниям семьи и друзей, он решился взять отпуск на летний семестр этого года. Все были уверены, что отдых излечит его, но судьба решила иначе: 21 (9) мая 1894 года Август Кундт тихо скончался — не стало знаменитого ученого и всемирного учителя, не стало одного из лучших людей [1].

Выяснить ученые заслуги Кундта в кратком очерке невозможно: в его многочисленных (более сорока) работах и в еще большем числе работ его учеников, преимущественно сделанных на предложенные им темы и всегда при непосредственном его содействии,— в этих работах заключается целый отдел истории физики: как методы, так и результаты этих исследований давно уже включены в элементы науки.

Сделанный нами хронологический перечень типических работ покойного ученого лишь напоминает нам, какими крупными приобретениями обязана наука Кундту, и свидетельствует о разносторонности, замечательном искусстве и плодовитости великого физика; но этот перечень не может дать нам представления о том огромном влиянии, которое имели работы Кундта на прогресс физики, о том влиянии, которое кроется во всеобщем интересе к его работам и неразрывно с ними связанными дальнейшими исследованиями других ученых.

Причину такой особенности работ Кундта надо искать, помимо других достоинств, еще и в том, что они не стояли особняком, а всегда были связаны незримыми нитями с современным им течением в физических исследованиях; они формулировали смутно чувствуемый всеми пробел и, давая простые основные результаты и удобные методы, невольно возбуждали целый ряд новых, непосредственно из них вытекающих вопросов по тем отраслям исследований, которыми были заняты многие физики — работы Кундта всегда находили готовых деятелей, и вопросы, затронутые им, быстро развивались. В своих работах Кундт является тем физиком-экспериментатором, который не пытается угадать и объяснить природу, а, пользуясь своим исключительным экспериментаторским талантом, заставляет ее говорить и отвечать на целый ряд систематически поставленных ей вопросов. Обладая замечательным «физическим чутьем» — Physikalische Nase, как он сам называл свой талант,— Кундт угадывал связь между отдельными, разнородными явлениями, а также с удивительной легкостью схватывал сущность математически развитой теории и всегда умел ребром поставить такой вопрос, который, являясь наиболее смелым следствием теории, был бы доступен непосредственному экспериментальному исследованию; с другой стороны, благодаря этой легкости усвоения и отличной

[1] От имени русских учеников В. А. Ульянин [29] возложил на гроб великого учителя венок с надписью: «Jhrem unvergesslichen Lehrer dankbaren Schüler aus Russland».

памяти Кундт без труда следил за всею физическою литературою и, интересуясь всем, всегда знал, по какому вопросу что сделано, и, что еще важнее, всегда знал, что и как надо сделать, чтобы подвинуть дело: благодаря этому у него никогда не было недостатка в благодарных темах для работ учеников и работы в его Институте всегда одновременно касались всех отделов физики.

Ясно и точно формулируя задачи данного исследования, Кундт при выполнении его является нам во всем блеске своего удивительного экспериментаторского таланта, поражая нас то простотою и изяществом приема (например, «кундтовы кривые дисперсий»), то борьбою с такими экспериментальными трудностями (например, «кундтовы призмы»), которые может оценить только тот, кто сам занимался аналогичными работами; его изобретательность в постановке вопроса, как это знают все работавшие у него, не имела границ, но в тех случаях, где изобретательность не могла помочь и являлась необходимость итти ощупью (например, «кундтовы зеркала»), он брал кропотливым трудолюбием и настойчивостью, иногда месяцами работая бесплодно, и многие из его работ под своей кажущейся простотой скрывают огромный труд.

Как ясна и проста была постановка вопроса и изящно его выполнение, так ясно и сжато было литературное изложение его работы; это образцовое изложение, конечно, также не мало способствовало популярности его исследований среди физиков.

Если Кундт, как ученый, являясь нам во всем блеске своего таланта, занимает одно из первых мест среди современных ему физиков, то Кундт, как учитель, представляет собою совершенно исключительное явление как лектор и как руководитель будущих деятелей.

Лекции по экспериментальной физике Кундт читал, согласно обычаям германских университетов, одновременно для студентов математического и медицинского факультетов в таком объеме, что весь курс занимал только два семестра по пяти часов в неделю, и, несмотря на такое стеснение во времени и в подготовке слушателей, он справлялся с огромным материалом и касался самых сложных вопросов, не нарушая ни общепонятности, ни гармонии целого.

Характеристической особенностью его курса была система изложения предмета. Кундт никогда не учил догматически, он всегда избегал внешней, формальной законченностью вызвать в слушателе неверное представление, что физика — законченная мертвая мозаика: в его изложении физика была живой наукой, в которой рядом с бесспорно установленными фактами была масса вытекающих из них новых вопросов, еще ждущих дальнейшей разработки; Кундт читал физику так, как он «чувствовал» ее, так, как она доступна только умственному оку глубокого исследователя, с теми особенными неуловимыми оттенками изложения, которые свойственны только очевидцу — на его лекциях слушатели невольно и незаметно проникались духом науки.

В изложении первенствующее значение играл опыт: он служил Кундту не как добавочная иллюстрация текста, а как материал для беседы; обращаясь к какому-нибудь классу явлений и охарактеризовав его в общих чертах, он — всегда сам — проводил опыт и по мере того, как перед глазами слушателей происходило данное явление, он комментировал его ясными простыми словами — он учил слушателей видеть и понимать самое явление, как оно совершается в природе, помимо внешних особенностей аппаратов. Всякая лекция, взятая в отдельности, являлась совершенно законченным произведением по прозрачности плана, ясности изложения и по массе замечательно изящно проделанных опытов, которые, сливаясь с текстом, представляли собою одно неразрывное органическое целое.

Чтобы вы, М. Г., могли составить себе представление о тех своеобразных приемах изложения, которыми пользовался Кундт, я позволю себе рассказать, как он, например, излагал явление потери фазы при отражении: знакомя слушателей с явлением ньютоновых колец в отраженном свете, Кундт выводил явления интерференции, как оно следует из геометрических условий (не вводя потерю фазы), получал, что центральное пятно должно быть светлым, и сейчас же приступал к опыту «для проверки теории»; со словами: «Я пускаю пучок света и получаю белое центральное пятно», он пускал свет и получал черное пятно, что, конечно, возбуждало в аудитории всеобщий ропот недоумения. «Итак, господа,— обращался Кундт,— опыт показывает, что теория наша неверна, что мы в чем-нибудь ошиблись, что мы игнорировали какое-нибудь существенное явление. Как мы бы ни изменяли этот опыт,— всегда он даст нам недочет в полволны; для того чтобы не расходиться с фактами, мы должны сделать гипотезу относительно изменения фазы и т. д.» Такой прием оказался настолько действительным, что даже студенты-медики знали о потере фазы на экзаменах.

Насколько популярен был Кундт как лектор среди студентов, указывает уже то обстоятельство, что раньше в Берлине у Гельмгольца, несмотря на все обаяние имени великого мыслителя, количество слушателей экспериментальной физики не превышало 200 человек, тогда как у Кундта спустя только два года по вступлении в должность число это более чем удвоилось, аудитория уже не могла вместить всех желающих и пришлось сделать в ней хоры. Часто среди слушателей занимали места и работающие в институте — «die älteren Herrn», как их называл Кундт — особенно когда лекция должна была касаться предмета, близкого работам самого Кундта: тут он превосходил самого себя, он переступал те границы, которые положены обыкновенному лектору, и являлся гениальным импровизатором; только прослушавшему такую лекцию становилось понятно, что Кундт мог говорить про себя:

«Vor allem bin ich Docent».

Как на необходимое подспорье при изучении физики Кундт смотрел на занятия студентов в физической лаборатории, где они, пользуясь предоставленными в их распоряжение приборами, экспериментально решали ряд задач из всех областей физики; Кундт расширил скромную программу лаборатории Магнуса и создал свой «das kleine physikalische Practicum»; важное значение таких занятий оценено теперь повсюду, и мы можем найти их в той же форме и по той же программе во всяком университете. Непосредственное руководство этими занятиями Кундт предоставлял своим ассистентам, так как молодые физики, занимавшиеся самостоятельными исследованиями — «das grosse Practicum» — и его собственные работы не оставляли ему свободного времени; только изредка приходил он в эту лабораторию, но тогда, всякий раз, как только замечал какое-либо затруднение у работающего студента, он тотчас же приходил ему на помощь, показывая, как надо делать, и следил за ходом опыта с неподдельным интересом.

Во всем объеме ярко выступали все особенности Кундта в связи с его простым дружеским отношением к людям, когда он являлся руководителем молодых «будущих» физиков, руководителем своей интернациональной Кундовской школы: за последние пятнадцать лет слава его распространилась далеко за пределы Германии, к нему стекались учиться не только изо всех государств Европы [1], но также и из Северной Америки и Японии люди отличные друг от друга не только по языку, но и по подготовке и по взглядам на науку; и всех этих людей Кундт умел соединить в одну дружескую семью, научал их понимать и любить живую науку, научал их работать на нераздельную, общечеловеческую пользу.

Главным стремлением Кундта было открыть перед начинающим физиком всю закулисную сторону научного исследования и дать ему возможность попробовать свои силы и научиться самостоятельно работать при самых благоприятных внешних условиях. Предоставляя всякому работающему полную свободу как в выборе темы, так и в разработке ее, Кундт особенно поощрял всякое проявление самостоятельности в работе: давал советы и указания в тех случаях, когда неопытный исследователь не был в состоянии сам справиться с какой-нибудь трудностью; Кундт, всегда вникая в мельчайшие детали работы, предоставлял работающему самому обдумывать различные приемы и испробовать их — он с первых шагов учил самостоятельности (если можно так сказать), видя в ней залог будущих успехов. Пользуясь такою свободою, начинающие студенты нередко брались за весьма трудные и неблагодарные темы или располагали опыт в очень несовершенной форме, но Кундт не мешал им и даже подбадривал при первых неудачах; в таком приеме великий учитель видел

[1] Заимствую из тепло написанного некролога «Памяти Учителя» Д. А. Гольдгаммера (Казань, 1894 г.) имена его русских учеников: кн. Голицин, Гольдгаммер, Де-Метц, Коновалов [30], Коленко [2], Лебедев, Михельсон, Натансон [31], Ростовцев [2], Световидов [2], Станкевич [32], Терешин [2], Ульянин, Щегляев [33] и, вероятно, еще несколько лиц.

особую пользу: «Пусть молодой физик,— говорил он,— сразу почувствует, что представляет из себя самостоятельное исследование — ряд неудач ему гораздо больше объяснит сущность дела, чем все мои описания».

В тех случаях, когда тема стоила того, чтобы ею заниматься, безразлично, была ли она дана самим Кундтом или нет, он являлся идеальным руководителем и помощником: благодаря превосходной памяти и большой эрудиции он указывал на целый ряд статей, иногда из совершенно разных областей науки, могущих быть полезными в данном случае, часто сам присаживался к приборам и показывал, как и на что в них надо обращать особое внимание, или сразу изобретал какой-нибудь крайне простой способ победить встретившееся затруднение. И все это он делал с той удивительной простотой, которая совершенно заставляла забывать, что он непосредственный начальник и знаменитый ученый.

Простота отношения имела огромное образовательное и воспитательное влияние: всякий, даже и мало подготовленный студент, всегда прямо обращался к нему за разрешением какого-нибудь недоразумения, которое нередко было простым незнанием, и Кундт разъяснял его простым разговорным языком, только касаясь вопроса, не делая никаких личных замечаний спрашивавшему.

Еще более интересны и поучительны были те случаи, когда вопрос касался какого-нибудь сложного и запутанного явления; нередко бывали случаи, что спрашивающий не сразу соглашался с взглядом Кундта и завязывались оживленные дебаты, в которых не только знание и остроумие, но и в особенности физическое чутье Кундта являлось в полной силе. Великий учитель ежедневно служил примером того, как надо разбираться в любом физическом вопросе; перед собеседником, неопытным в такой работе, открывалась закулисная сторона обдумывания вопроса, видно было, что ответ получался в окончательном виде не сразу, а слагался из отдельных, разрозненных сведений, под влиянием обобщающих аналогий, неразрывно связанных с природой, далеких от всяких гипотез — Кундт учил «физически думать»—«physikalisch denken», как он это сам называл.

В еще большей мере учил он «физически работать» — «physikalisch arbeiten», открывая перед начинающим исследователем полную картину экспериментальной работы: Кундт всегда настаивал на постоянном общении всех занимающихся у него самостоятельными исследованиями (число которых доходило до двадцати единовременно), и это общение носило самый симпатичный товарищеский оттенок, так как на него благотворным образом влияла простота обращения самого Кундта, сглаживая все те различия, которые могли бы быть между учениками. Всматриваясь в эту разнообразную работу, молодой физик не только расширял свои познания, беседуя с товарищами по специально их занимающим вопросам,— следя за ходом их работ он осваивался с духом экспериментальных исследований вообще, он видел, как шаг за шагом создавался метод исследования, как появлялись затруднения, с которыми приходилось бороть-

ся иногда без полной надежды на успех, как под влиянием их изменяются приемы работ и как, наконец, ценою долгих усилий его товарищи, ничем от него не отличавшиеся, получали ясные интересные результаты, подобные тем, которые мы находим в курсе физики, он научался ценить всю прелесть научной работы, перед ним открывалась сущность ее, и в нем крепла уверенность в возможности сделать новое исследование. С другой стороны, это постоянное общение давало совершенно незаметно массу практических сведений и приемов, которые так необходимы в лаборатории, и предостерегало от ряда бесплодных попыток, которые делали товарищи.

Организация занятий в институте вполне соответствовала духу Кундтовской школы. Официально институт был открыт в течение всего семестра пять раз в неделю от 8 до 12 и от 2 до 6 часов, но в действительности не было никаких стеснений во времени занятий, и Кундт охотно разрешал работать не только поздно вечером, но даже ночью, а также в течение вакации, если того требовала работа — с условием не тревожить никого в институте. Каждому из работающих предоставлялась отдельная комната, если то позволяло помещение, а также и все необходимые приборы, подчас весьма ценные; в тех случаях, когда даже в богатом физическом кабинете Кундта не было нужных аппаратов и из предварительных грубых опытов было видно, что исследование может дать хорошие результаты, щедрость Кундта являлась на помощь и прибор, нередко составленный по проекту ученика, немедленно заказывался. Ставя своих учеников в те наивыгоднейшие условия научного комфорта, которыми можно было располагать в его институте, Кундт постоянно являлся их помощником и руководителем: с восьми часов утра повсюду слышны были его быстрые шаги и его громкий голос,— Кундт, сопровождаемый ассистентом, обходил занимавшихся самостоятельными исследованиями, и, выслушивая отчет о ходе работ, делал замечания, давал советы или беседовал по поводу какого-нибудь нового вопроса, нередко оканчивая свое посещение на какой-нибудь шутке, полной того особого юмора и остроумия, которым он отличался. В тех случаях, когда являлась необходимость увидать Кундта в течение дня, всегда можно было постучаться в дверь его комнаты, и услышать «herein» («войдите»): он всегда был занят чем-нибудь, но тотчас же отрывался и сосредоточивал весь свой интерес на вопросе ученика.

Обаяние Кундта, помимо его огромного таланта, особенно сильно импонирующего при ежедневном непосредственном соприкосновении, заключалось в том теплом, дружеском отношении к людям, в той отзывчивости, которая свойственна только очень немногим: в каждом из своих учеников он видел и уважал прежде всего будущего деятеля науки, ценил в человеке его любовь к делу и способности работать; только к тем единичным личностям, у которых научный интерес отступал перед интересами другого рода, его отношения были холодны — их он не считал

своими товарищами по труду. Особенно ясно выступали эти дружеские отношения, когда кому-нибудь из работающих удавалось после долгих трудов получить искомый результат: тогда Кундт, обходя всех, с воодушевлением рассказывал об этом успехе и обыкновенно прибавлял: «der kann was» [1]; в этих немногих словах сказывалось все стремление Кундта создать способных научных работников, и он любил их всех за те их будущие работы, которые предвидел.

Оценить влияние на учеников этого непосредственного общения с великим учителем и той чисто научной атмосферы, где впервые пробудилась и окрепла любовь их к серьезной, самостоятельной научной работе,— оценить их невозможно; они сказались и сказываются в работах, произведенных далеко от института Кундта, выступая независимо от индивидуальных особенностей авторов в том, что мы привыкли называть духом Кундтовской школы.

Но не только деятельных ученых стремился создавать Кундт — он одновременно заботился и о том, чтобы дать возможность развиться их лекторским способностям, чтобы научить их ясно передавать чужие мысли, а также ознакомить их с современным состоянием физики, ввести в современную физическую литературу.

«Das physikalische Colloquium» на несколько более широких основаниях, чем он был у Магнуса, являлся таким желательным подспорьем: еженедельно по четвергам от шести до восьми часов вечера в большой аудитории или в библиотеке собирались желающие принять участие студенты первых семестров, занимающиеся самостоятельными исследованиями, ассистенты и профессора родственных физике наук; сначала обыкновенно все толпились около стола, заваленного только что вышедшими тетрадками физических журналов и отдельными оттисками статей, которые в огромном количестве получал Кундт; всякий намечал статьи, наиболее его интересующие, и вскоре все рассаживались по местам, причем предварительно Кундт спрашивал, кто и что собирается реферировать в будущий четверг; затем выступал тот, кто в прошлый раз обещался сделать сообщение, и Colloquium начинался.

Не говоря уже о том, что каждый реферат знакомил слушателей с новым и обыкновенно интересным исследованием, эти беседы имели и совершенно своеобразное воспитательное значение: перед студентом первых семестров они открывали чуждую ему картину роста и непрерывного развития науки, как оно сказывалось в целой кипе новых журналов, из которых по рефератам он узнавал наиболее важные и понятные ему успехи — с первых семестров своего пребывания в университете он сроднялся с мыслью, что наука живет, допускает творческую деятельность и требует ее. Для неопытных референтов Colloquium был превосходной школой, которая учила разбираться в данном материале, выбирать и выяснять существенные результаты иссле-

[1] «Этот может работать!»



Рис. 6. Физический институт Страсбургского университета

дований и оттенять их значение и, кроме того, учила говорить с кафедры; если такой реферат всегда давал нечто новое слушателям, то несравненно больше он был полезен самому референту, давая ему возможность на опыте попробовать свои силы и яснее увидеть свои недостатки.

Часто референтами выступали профессора и ассистенты, которые желали познакомить слушателей с каким-нибудь только что появившимся замечательным исследованием или подвести итог работ новейшего времени по какому-нибудь специальному вопросу.

По окончании каждого реферата (их обыкновенно было три) следовало обсуждение изложенного исследования, причем к референту обращался всякий желающий как к лицу, наиболее знакомому с предметом, для дальнейшего разъяснения,— завязывалась общая беседа, высказывались новые соображения; предоставляя всякому свободно высказываться и всегда поддерживая такую беседу, Кундт обладал особой способностью не стеснять своим присутствием, не подавлять своим знанием и талантом: только изредка вставлял он, как бы мимоходом, коротенькие замечания, которые незаметно направляли ход беседы, незаметно увеличивали общее одушевление, порождая новые соображения, и нередко приводили к какой-нибудь интересной теме для дальнейших исследований. Что особенно было дорого в этих Colloquia — это та простота и то товарищеское отношение между отдельными участниками собрания, в котором Кундт ставил себя равным только что поступившему студенту; всякий свободно и не колеблясь высказывал какое-нибудь сомнение, только что пришедшее ему на

мысль, в полной уверенности, что даже в том случае, когда его вопрос и неоснователен, то и тогда никому не придет в голову посмеяться над ним и всегда его недоразумение будет разъяснено знающим человеком.

В течение семестра на кафедре перед слушателем дефилировали все народности, слышалась немецкая речь не только с разными местными оттенками соединенной Германии, но и со всеми теми национальными отзвуками и неправильностями, с которыми говорят иностранцы, начиная от Сан-Франциско до Токио; перед слушателем выступал только что начинающий студент рядом с ученым, имя которого пользуется заслуженною известностью—всех их Кундт соединял в одно целое, одушевленное одним общим интересом. Под влиянием таких бесед в каждом участнике незаметно вырабатывалось представление о современном состоянии физики, о беспрерывном ее развитии и о той огромной интернациональной работе, в которой каждый мог принять участие; если занятия в институте учили, как надо физически думать и работать по различным отраслям физики, то Colloquium захватывал в самую середину современного научного течения, делал науку близкой и родной, открывая новые, невиданные горизонты. Все, что было необходимо физику, Кундт давал своим ученикам в изобилии, уча и воспитывая их, и каждый уносил на свою далекую родину неоцененное богатство знаний и вкрапленные в них отблески гения великого учителя.

Говоря о еженедельных Colloquia, нельзя не упомянуть и о том, что после каждого из них все участники собирались под председательством самого Кундта в какой-нибудь пивной, чтобы за кружкой пива в дружеской беседе провести вечер. Вряд ли кто-нибудь из посторонних посетителей мог представить себе, что наиболее живой и веселый в этом кружке молодежи — знаменитый ученый и член многих Академий! Обладая замечательным даром слова, неистощимым остроумием и тонким художественным чутьем, Кундт всегда был душою общества: веселые добродушные шутки не прекращались и разнообразные афоризмы придавали особый оттенок его беседе; чтобы дать о них понятие, я позволю себе на память привести хотя некоторые из них. Так, рассуждая о каком-нибудь сложном вопросе, Кундт обыкновенно заканчивал: «Probieren geht über Studieren» [1] — этим догматом своей школы; характеристичен также его рецепт работать: «Zuerst die Frage präcisiren, dann reiflich überlegen, wie man es am besten macht, und nun solange probieren, bis es geht» [2], в нем сказывается вся та выдержка в борьбе с экспериментальными трудностями, которая удивляет нас в его работах. Если кто-нибудь под влиянием неудач начинал отчаиваться и говорить, что работа невозможна, то Кундт утверждал: «Was physikalisch möglich ist, kann technisch nicht un-

---

[1] «Опыт важнее (больше даст), чем изучение теории».

[2] «Сперва ясно поставить вопрос, потом зрело обсудить, как к нему лучше всего подступиться, а потом до тех пор пробовать, покуда пойдет».

möglicht sein es muss gehen»[1] — это девиз всех его работ, в которых так ясно сказывалась его безграничная изобретательность.

Молодым физикам он всегда особенно советовал привыкать к самостоятельному критическому и творческому мышлению, а также не мерить знания количественно, говоря, что в книжном шкафу всегда больше уже известного, чем в любой человеческой голове — что не в этом задача физика «Nur wissen ist für einen Physiker noch sehr wenig — er muss vor allem auch was können[2], в творческой работе он видел мерило значения физики, и сам он в наивысшей мере удовлетворял этому требованию. Подобные афоризмы, перемешанные с веселыми шутками, у него встречались на каждом шагу, и в них он также незаметно, непрерывно являлся бесподобным учителем, слова которого гораздо глубже западали в душу слушателя, чем это может показаться с первого взгляда.

Особенно интересны были его воспоминания; он был лично знаком со всеми современными физиками Европы и Америки, часто сталкивался с ними, путешествуя во время каникул по Швейцарии; мастерски набрасывал он портрет ученого, перед глазами слушателей, привыкших к имени того ученого как к звуку, вырисовывался живой человек, со всеми его особенностями, и всякий с интересом следил за описанием какой-нибудь совместной прогулки, тем более что Кундт мимоходом, описывая Швейцарию, высказывал свою художественную чуткость.

Кундт особенно охотно вспоминал годы своей молодости, то положение физики, из которого она развилась на его глазах, описывал ту школу, те скудные средства, которыми приходилось довольствоваться, и с любовью всегда говорил о своем учителе — Магнусе, заветы которого свято храня, ученик превзошел учителя и создал для всего мира, то что создал Магнус для маленького кружка немецких физиков. Свои воспоминания о Магнусе Кундт неоднократно заканчивал такими словами: «вся жизнь моя сложилась счастливо, но счастливее всего было время, когда я был у Магнуса». Далеко не все ученики Кундта могут сказать про себя, что жизнь их сложилась счастливо, но каждый из них скажет, что самое счастливое время жизни он провел, работая у великого учителя.

В лице Кундта наука потеряла физика в самом широком смысле этого звания: не только первоклассного ученого, так много потрудившегося для современной физики, но и несравненного учителя, который заботился о будущем своей любимой науки, образуя и воспитывая ей будущих деятелей. Если Кундт, в течение всей своей жизни неутомимо работая, старался возможно более расширить область нашего знания своими исследованиями, то, может быть, в еще большей мере он стремился передать каждому из своих учеников частичку своей души, частичку той бескорыстной любви к науке, которая ведет человечество к истине.

---

[1] «Что возможно физически, то не может быть технически невозможным — оно должно итти».

[2] «Только знать — еще слишком мало для физика: он должен прежде всего иметь способность творчески работать».



5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛН НА РЕЗОНАТОРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Гениальные работы Герца открыли исследованию необозримую область явлений, указав приемы получать и наблюдать электромагнитные волны разной длины. Герц показал, что эти волны по своей физической природе тождественны с волнами видимого света: все учение о свете (о лучистой энергии) является нам теперь не независимым отделом физики, а представляет собой лишь главу в учении об электрических колебаниях. Обширная литература последних десяти лет свидетельствует нам, как разнообразно были исследованы явления электрических колебаний, причем одни исследователи (Righi [1], Garbasso [2], Lodge [3] и др.) занялись изучением распространения этих колебаний в среде и, пользуясь достаточно короткими волнами, проследили и установили тождество между электромагнитными и оптическими явлениями в самых разнообразных случаях, тогда как другие исследователи (Cohn [4], Drude [4], Bjerknès [5], Birkeland [6], и др.) обратились к исследованию электромагнитных свойств и особенностей среды, в которой распространяются эти колебания.

В исследовании Герца, в интерпретации световых колебаний как электромагнитных процессов, открыта еще и другая до сих пор не затронутая задача — задача об источниках лучеиспускания, о тех процессах, которые совершаются в молекулярном вибраторе в то время, когда он отдает световую энергию в окружающее пространство; такая задача ведет нас, с одной стороны, в область спектрального анализа, а с другой,— как бы совершенно неожиданно приводит к одному из наиболее сложных вопросов современной физики — к учению о молекулярных силах. Последнее обстоятельство вытекает из следующих соображений: становясь на точку зрения электромагнитной теории света, мы должны утверждать, что меж-

ду двумя лучеиспускающими молекулами, как между двумя вибраторами, в которых возбуждены электромагнитные колебания, существуют пондеромоторные силы: они обусловлены электродинамическими взаимодействиями переменных электрических токов в молекулах (по законам Ампера) или переменных зарядов в них (по законам Кулона); мы, следовательно, должны утверждать, что между молекулами в этом случае существуют молекулярные силы, причина которых неразрывно связана с процессами лучеиспускания.

Наибольший интерес и наибольшую трудность по своей сложности представляет собой случай, имеющий место в физическом теле, в котором одновременно действуют друг на друга много молекул, причем колебания этих последних благодаря их близкому соседству не независимы друг от друга. Если когда-нибудь явится возможность вполне решить этот вопрос, то, пользуясь данными спектрального анализа, мы можем заранее предвычислить величины интермолекулярных сил, обусловленных взаимным лучеиспусканием молекул, указать законы зависимости их от температуры и, сравнивая эти вычисленные величины с наблюдаемыми на опыте, решить коренной вопрос молекулярной физики: сводятся ли все так называемые «молекулярные силы» к заранее известному и указанному выше пондеромоторному действию лучеиспускания, электромагнитным силам, или в состав их входят еще и другие силы неизвестного до сих пор происхождения.

Предвидеть результаты подобного исследования, а тем более утверждать, что все молекулярные силы обусловлены исключительно указанными электромагнитными силами, мы в настоящее время не имеем никаких оснований, но мы не можем не указать на характерные особенности их: эти силы не зависят от масс молекул, они связаны с индивидуальными (спектральными) свойствами их и, кроме того, в сильной степени зависят от температуры, т. е. обладают именно теми свойствами, которые мы приписываем молекулярным силам в явлениях сцепления, растворения или химических реакций. Вопросы, здесь затронутые, как казалось мне, представляют большой интерес, почему я и взялся за их изучение.

Уже на первых порах развитие изложенных выше представлений привело к любопытному результату. Стараясь доказать существование механического (пондеромоторного) действия световых колебаний на отдельные молекулы, я обратился к тому случаю, где условия этого действия представляют наибольшую простоту и доступны непосредственному наблюдению: в таких условиях находится разреженный газ кометных хвостов, пронизываемый лучами Солнца. Чтоб объяснить наблюдаемую в этих случаях отталкивательную силу Солнца, я воспользовался таким соображением: на основании выводов Maxwell'a и Bartoli относительно величины светового давления, мне удалось показать [1], что ньютоновское

[1] П. Лебедев. Труды Отд. физ. наук ОЛЕ, 4, вып. 2, стр. 1, 1891; Wied. Ann., 45, p. 292, 1891; Phil. Mag., (5) 33, p. 391, 1892.

притяжение Солнца ослабляется отталкивательной силой его лучеиспускания, причем для тел малой массы, для микроскопических пылинок, отталкивательная сила начинает преобладать. Естественно поэтому предположить, что и наблюдаемое отталкивание отдельных молекул кометных хвостов обусловливается пондеромоторным действием света; гипотеза Цельнера об электризации Солнца и кометных газов, которая появилась только для объяснения наблюдаемого отталкивания и заставляет предполагать какие-то особые, до сих пор не известные нам в лаборатории процессы электризации газов, гипотеза эта при указанном выше свойстве световых лучей делается излишнею; в своей академической речи «О физических переменах в небесных телах» Ф. А. Бредихин [1] обращает внимание на данное мною объяснение отталкивания кометных хвостов Солнцем.

Переходя от световых сил, действующих в межпланетном пространстве, к тем же силам в интермолекулярных областях, приходится наиболее интересную общую задачу о пондеромоторном воздействии многих близких друг от друга и притом непрерывно перемещающихся молекул разбить на ряд отдельных, по возможности простых вопросов, для того чтобы подготовить путь к решению общего случая.

Простейшей и ближайшей задачей естественно представляется вопрос о действии простой (монохроматической) волны на отдельную покоющуюся молекулу в зависимости от отношения периодов падающей волны и собственного периода молекулы. Решению этой задачи и были посвящены мои работы.

Непосредственно и притом в достаточно простой форме экспериментально исследовать действие света на отдельные молекулы какого-либо тела не представляется возможным, а потому я обратился к опытам с длинными электромагнитными волнами Герца, заставляя их действовать на схематическую «молекулу», которая обладает интересующими нас свойствами, т. е. имеет собственный период колебания,— ею является подвешенный на крутильной нити резонатор (см. гл. 1). Изменяя по желанию период колебания резонатора (что не представляет каких-либо затруднений) и заставляя падать на него электромагнитную волну определенной длины, мы можем наблюдать образующиеся в этом случае пондеромоторные силы и установить законы их зависимости от резонанса [2].

Дальнейшему ходу исследования представлялось два пути: или, оставаясь на почве электромагнитной теории света, пользуясь для опытов электромагнитными волнами, исследовать законы совместных колебаний двух, а затем и нескольких сопряженных систем, имеющих собственные периоды колебаний,— вопрос, в настоящее время обстоятельно

---

[1] Ф. А. Бредихин. «О физических переменах в небесных телах». Акад. речь. СПб., 1893.

[2] P. Lebedew. Wied. Ann., 52, p. 521, 1894.

разработанный в статьях князя Б. Голицина, Oberbeck'a [7] и Wien'a [8], — для того чтобы потом обратиться к изучению действующих между указанными системами электромагнитных «интермолекулярных» сил, или другой путь, по которому все исследование так, как оно было сделано для электромагнитных колебаний, распространяется на разного рода колебания. Уже приступая к первой работе, я имел в виду вести ее по этому второму пути и вот почему: останавливаясь только на исследовании электромагнитных волн, мы тем самым ограничиваем и круг применения найденных нами законов такими системами, которые не представляют существенного отличия от наших металлических резонаторов с определенными емкостями и кругами самоиндукции, но с которыми отождествлять действительные молекулы мы не имеем основания; перенося исследование на колебания, отличные по своей физической природе, и находя связь между законами их пондеромоторного действия на резонаторы, мы тем самым расширяем приложимость найденных законов и на те случаи, в которых как механизм самого колебания, так и механизм воспринимающего его резонатора может остаться неизвестным.

От электромагнитных волн я перешел к исследованию гидродинамических колебаний, распространяя известные работы Bjerknes'a [9], изучившего пондеромоторные силы при независимых движениях, на явления колеблемого резонатора. В своих работах Bjerknes, отыскивая аналогию между статическими явлениями электричества и магнетизма, с одной стороны, и гидродинамическими колебаниями, с другой, находит ее не прямой, а обратной; вот почему особый интерес представляет собой найденный мною факт, что при сравнении электрических колебаний с колебаниями гидродинамическими эта аналогия оказывается полной и прямой (см. гл. II).

После этих работ я перешел к изучению звуковых колебаний; тут представлялась возможность экспериментально исследовать действие звучащего источника не только на резонатор, находящийся в непосредственном соседстве с ним, но и проследить это действие при значительных расстояниях первого от последнего.

Здесь открылась одна особенность явления, которая представлялась мне совершенно неожиданной; в то время как в непосредственной близости от источника закон пондеромоторного действия акустической волны на ее резонатор тождествен с соответствующим законом для электромагнитных, а также и для гидродинамических колебаний, при постепенном увеличении расстояния это тождество постепенно стушевывается и его место занимает новый закон, совершенно отличный от предыдущего: так, при малых расстояниях наблюдается вблизи резонанса, при переходе через него, изменение от максимального притяжения через ноль (при полном резонансе) к максимальному отталкиванию резонатора источником, тогда как при увеличении расстояния от последнего притяжение, понемногу сглаживаясь, наконец совершенно исчезает, и его место засту-

пает отталкивание (наибольшая величина которого при полном резонансе) (см. гл. III [1]).

Долгое время эта особенность, это отличие от электромагнитных колебаний смущали меня, покуда мне не удалось показать теоретически на основании особенностей распределения поляризации среды в проходящей волне, что такой случай должен иметь место и для электромагнитных волн [2] в том случае, если расстояния между источником и резонатором будут достаточно велики; в природе подобное явление (в более сложной форме) представляет собою отталкивательное действие солнечных лучей на газовые молекулы кометных хвостов.

Перечисленные работы ведут к тому интересному и новому результату, что, несмотря на все различие в физической природе колебаний электромагнитных, гидродинамических и акустических, законы пондеромоторного действия их на соответствующие резонаторы тождественны; это указывает нам на вероятность того, что элементарные законы, нами найденные, общи для всех возможных (и еще не исследованных нами) колебаний, и их обоснование надо искать в причинах, не зависящих от особенностей действующего колебания и возбуждаемого им резонатора.

Подводя итоги всему вышесказанному, мы видим, что электромагнитная гипотеза света приводит нас к необходимости признавать световые интермолекулярные силы, а дальнейшее изучение вопроса освобождает нас от этой гипотезы: оно показывает нам, что существование подобных сил мы должны допустить совершенно независимо от той или другой гипотезы относительно физической природы световых колебаний.

Перед нами открыто широкое поле — на основании полученных результатов изучать более сложные вопросы и, пользуясь непосредственным опытом, поверять на нем наши соображения или исследовать новые, может быть, неожиданные особенности интересующих нас пондеромоторных сил; осторожно и уверенно двигаясь по этому пути, мы можем подготовить и решение нашей главной задачи: пользуясь данными спектрального анализа, вычислить абсолютную величину сил взаимодействия молекул какого-нибудь тела, обусловленную их взаимным лучеиспусканием.

Глава I

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Первая попытка обнаружить пондеромоторные силы, вызываемые электрическими и магнитными действиями между двумя резонаторами, возбужденными электромагнитной волной, была сделана Boys, Briscoe и

[1] P. Lebedew. Wied. Ann., **62**, p. 158, 1897.
[2] P. Lebedew. Wied. Ann., **62**, p. 170, 1897.

Watson [1], и, несмотря на замечательную чувствительность метода, в котором ясно высказалась виртуозность такого знаменитого экспериментатора, как Boys, результат оказался отрицательным. При появлении этой работы план моего исследования пондеромоторного действия электромагнитной волны на резонатор в зависимости от резонанса был в основных чертах выяснен, и я приступил к его выполнению, несмотря на неудачу Boys'а [10] и других, так как работы Hertz'а [2] позволяли предполагать возможность успеха.

Трудности, с которыми приходилось сталкиваться, обусловливались главным образом новизной экспериментальной техники и лежали как в приемах возбуждения правильных и достаточно сильных колебаний, так и в измерении длин волн резонаторов; наконец, выработка конструкции особого типа резонаторов, которая соединяла бы в себе возможность изменять в широких пределах его период с наименьшим весом прибора, — все это заняло около трех лет работы и повело к вполне удобному расположению опытов.

I. Расположение опытов

Расположение опытов было в общих чертах следующее: первичный проводник Герца, который благодаря быстрому затуханию колебаний в нем сам непригоден как источник волн, возбуждает колебания в металлическом проводнике, резонирующем на его колебания, этот проводник мы будем называть вибратором: в вибраторе колебания затухают лишь весьма медленно, и поэтому им с успехом можно пользоваться как источником электромагнитных волн неизменного периода. Вблизи вибратора помещен подвешенный на крутильной нити очень легкий резонатор таким образом, что колебания вибратора возбуждают его, а вместе с тем стремятся повернуть его в ту или другую сторону; углом кручения измеряются интересующие нас пондеромоторные силы; резонатор устроен так, что его период можно по произволу изменять в известных пределах и каждый раз определять этот период измерением длины волны, соответствующей резонатору.

Наблюдения проводились таким образом: период резонатора по произволу изменялся и потом определялась как длина соответствующей ему волны, так и величина действующей на него пондеромоторной силы; таким образом серия наблюдений дает непосредственно искомую связь между длиной волны резонатора и величиной пондеромоторной силы при действии на резонатор неизменного источника колебаний.

При производстве подобных серий наблюдений приходится считаться с неудобством, что возбуждение вибратора колеблется в зависимости от

---

[1] C. V. Boys, A. E. Briscoe [11] and W. Watson [12]. Phil. Mag., (5) **31**, p. 50, 1891.

[2] H. Hertz. Wied. Ann., **42**, p. 407, 1891; Werke, **2**, p. 199.

непостоянства искры в первичном проводнике; для того чтобы сравнивать отдельные наблюдения кручения, величина возбуждения вибратора постоянно контролировалась особым аппаратом, по устройству сходным в одном случае с индукционным электродинамометром, а в другом — с электрометром, мы будем называть его в последующем индикатором. Действия вибратора на резонатор и на индикатор наблюдались одновременно, и угол отклонения первого приводился путем вычисления к некоторому постоянному углу отклонения индикатора, т. е. к постоянному возбуждению вибратора.

Так как в общем случае действия электромагнитного колебания на резонатор, когда на этот последний влияют одновременно и магнитная и электрическая слагающие колебания, исследование не представляется достаточно простым, то опыты были поставлены таким образом, что в одном случае только магнитная составляющая колебания могла действовать на резонатор, а в другом — только электрическая; необходимые для изменения периода перемены в резонаторах делались в тех частях, на которые колебание не действует непосредственно, т. е. в конденсаторе резонатора в первом случае и в круге его самоиндукции во втором. Приборы. которые удовлетворяют указанным требованиям, в последующем обозначены «магнитными» и «электрическими».

II. Приборы

1. *Возбудитель* (первичный проводник) имел следующее устройство: две цинковые полосы Z_1 и Z_2 (каждая по 20 *см* ширины и 45 *см* длины) изогнуты, как показано на рис. 1, и скреплены эбонитовыми клеммами E_1 и E_2; чтоб избежать внутренних искровых разрядов, эти цинковые полосы разделены тонкой эбонитовой стенкой (на рис. 1 не показанной). При

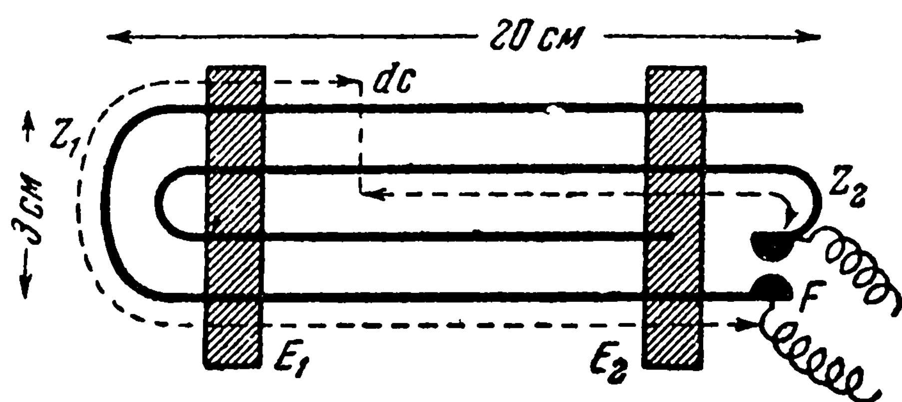


Рис. 1

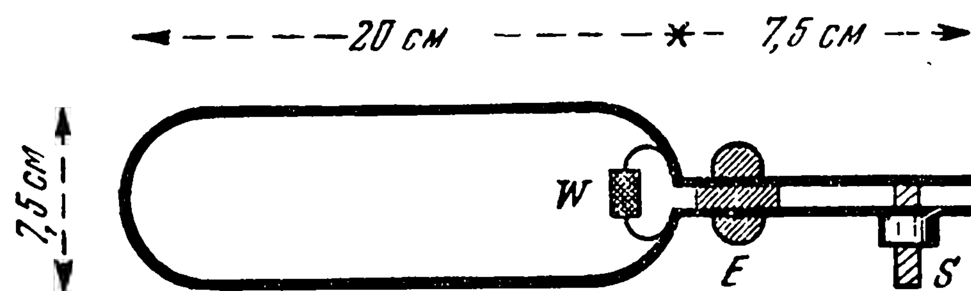


Рис. 2

таком устройстве незначительная самоиндукция так связана с довольно большой емкостью, что для каждого элемента *dc* конденсатора путь тока, проходящий через искру (и обозначенный на рис. 1 пунктиром), всюду имеет почти одинаковую длину; электростатическое действие на расстояние такого возбудителя ничтожно мало в том случае, когда полюс

индуктория, связанный с внешней полосой Z_1, отведен к земле; такая особенность конструкции возбудителя является необходимым условием, чтобы отклонения подвешенного резонатора были обусловлены исключительно действиями колебательных зарядов без примеси прямых электростатических сил, действие которых так резко сказывается в первичных проводниках Герца. Искра перескакивала между двумя платиновыми колпачками[1] F. Для возбуждения служил маленький индукторий, который при трех аккумуляторах давал 40 разрядов в секунду. Длина волны этого возбудителя, как показало измерение длин волн соответствующих ему вспомогательных резонаторов, была около $\lambda = 350$ *см*.

2. *Магнитный вибратор*, который был расположен над первичным проводником и возбуждался этим последним, состоял из цинковой полосы (20 *см* ширины и 65 *см* длины) и имел форму, указанную на рис. 2; эбонитовые прокладки E связывали концы полосы; эбонитовый винт S служил для того, чтобы с помощью изменения расстояния между поверхностями конденсатора (которое было около 2 *мм*) изменять период колебания вибратора (в пределах от $\lambda_1 = 320$ *см* до $\lambda_2 = 380$ *см*) и настраивать его в резонанс с возбудителем; раз настроенный, он в течение всей серии измерений оставался без изменения. Чтобы иметь возможность увеличивать затухание (без заметного изменения периода), можно было параллельно конденсатору вводить слабо проводящую колонну жидкости (с ничтожной величиной самоиндукции). Период колебания этого вибратора определялся непосредственно измерением соответствующей ему длины волны в проволоках (см. ниже); с этой целью к конденсатору присоединялся маленький искровой микрометр, который во время действия прибора как вибратора был удаляем.

Магнитное действие на расстоянии этого вибратора мы можем сравнить с действием рамки мультипликатора, по которой проходит переменный ток.

3. *Магнитный резонатор* изображен на рис. 3. Весь резонатор укреплен на тонком стеклянном стержне, который имеет наверху крючок для подвешивания к крутильной нити. Круг его самоиндукции состоит из четырех оборотов тонкой серебряной проволоки J, а конденсатор образуют две пластинки C_1 и C_2 из алюминия (наподобие стрелок квадрант-электрометра Томсона). Верхняя из этих стрелок приклеена к стеклянному стержню, а нижняя имеет втулку, обхватывающую этот стержень, и удерживается надетым на этот последний кольцом на неизменном расстоянии от верхней пластинки (эти детали на чертеже не видны); для изменения емкости конденсатора нижнюю пластинку можно вращать и потом закреплять воском; этим приемом можно изменять длину волны резонатора в пределах от $\lambda = 280$ *см* до $\lambda = 420$ *см*, не изменяя момента инерции всей системы. Общий вес всего резонатора был 1 *г*.

---

[1] Klemenčič [13]. Wied. Ann., **42**, p. 467, 1891.

Для измерения длины волны резонатора, соответствующей данному положению его конденсатора, которое производилось при помощи измерения длины волны в проволоках, на стеклянном стержне устроен искровой микрометр F: искра образуется между двумя платиновыми ушками, из которых одно можно достаточно удобно уставлять при помощи выступающей проволочки (см. рис. 3). Во время определения механического действия колебания эти ушки находились на таком расстоянии друг от друга, что и при самых сильных возбуждениях искры между ними не могли перескакивать.

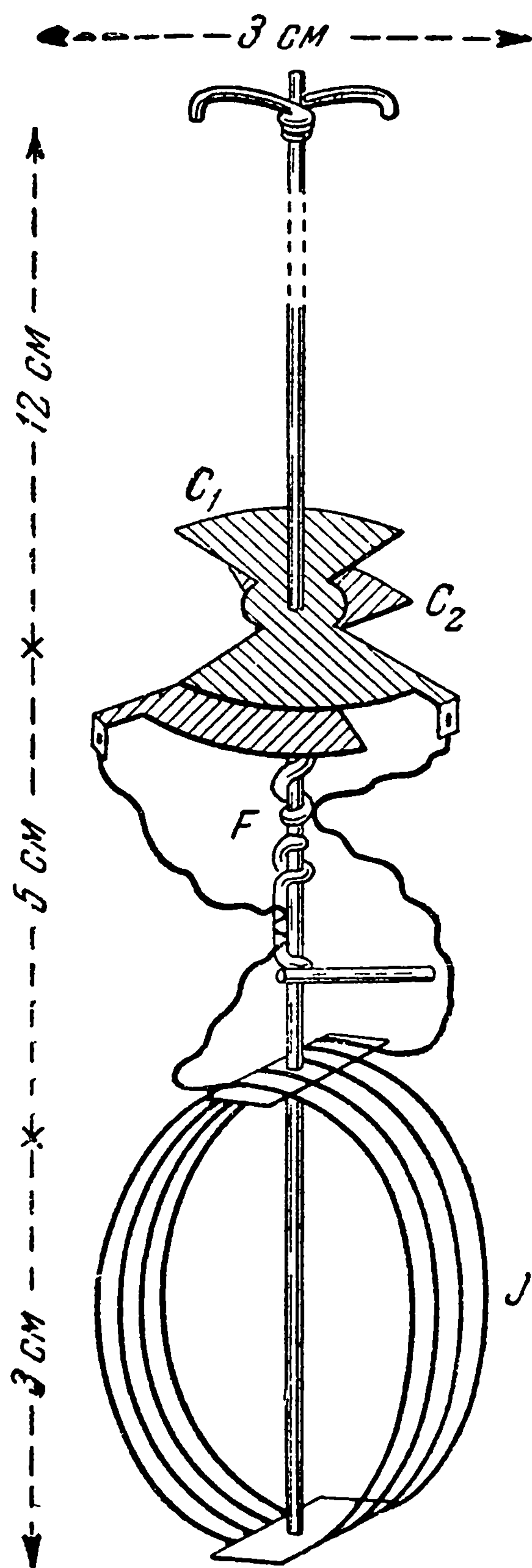


Рис. 3

Из расположения конденсатора видно, что электрическая слагающая колебания, действуя на накопляемые на нем заряды, по условиям симметрии не может вызвать сил, вращающих крутильную нить; только магнитные силы, действуя на круг самоиндукции, могут поворачивать резонатор. Во время исследования этих сил резонатор помещался на расстоянии около 8 *см* над магнитным вибратором и в положении равновесия был установлен так, что его магнитная ось составляла угол, близкий к 45° с линиями магнитных сил вибратора; при указанном расположении прибора электрическая слагающая колебания, которая не может действовать пондеромоторно на резонатор, не могла и возбуждать его. Резонатор находился, следовательно, под действием исключительно магнитных сил.

Мы можем рассматривать наш резонатор как катушку индукционного динамометра, концы которой соединены не между собой, а связаны с обкладками конденсатора, благодаря чему вся система имеет определенный собственный период колебания.

4. *Магнитный индикатор* представляет собою замкнутое проволочное кольцо (D = 15 *мм*) из тонкой серебряной проволоки: он был помещен внутри магнитного вибратора, подвешен на крутильной нити и так же ориентирован, как резонатор; прибор представляет собою таким образом простой индукционный динамометр.

5. *Электрический вибратор* (рис. 4) состоял из двух пластинок P_1 и P_2 (40 × 40 *см*), связанных между собой металлической полоской K (20 *см* ширины и 55 *см* длины) и удерживаемых друг против друга на

расстоянии 25 *см* четырьмя стеклянными стержнями *G*, *G*; когда первичный проводник (1) возбуждает колебания в электрическом вибраторе, то между пластинками P_1 и P_2 образуется электрическое поле, достаточно равномерное. Длина волны этого вибратора определялась так же, как в случае магнитного вибратора (2), и была около 350 *см*.

6. *Электрический резонатор* (рис. 5) укреплен на тонком стеклянном стержне, снабженном наверху крючками для подвешивания к крутильной нити. Круг самоиндукции *J* представляет собою длинный соленоид из тонкой серебряной проволоки, укрепленный на бумажной пластинке; конденсатором служат два цилиндрических квадранта C_1 и C_2, которые для уменьшения момента инерции состоят не из сплошных металлических пластинок, а из отдельных алюминиевых полосок (по 2 *мм*

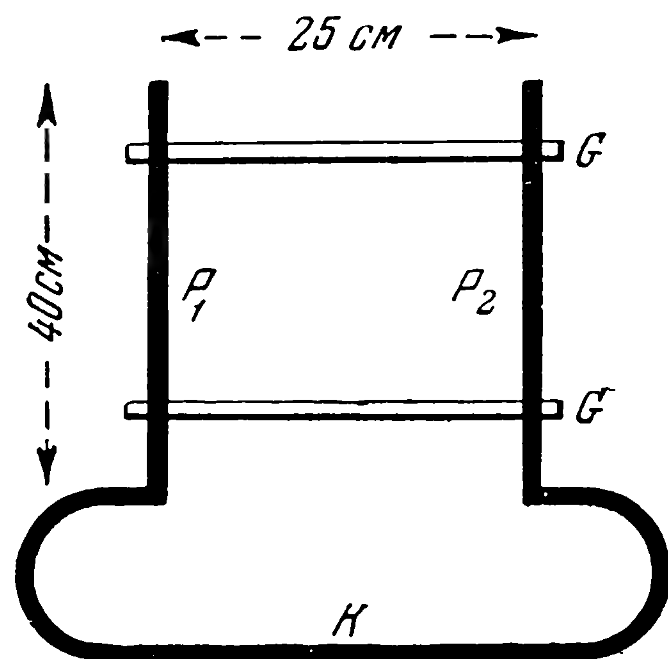


Рис. 4

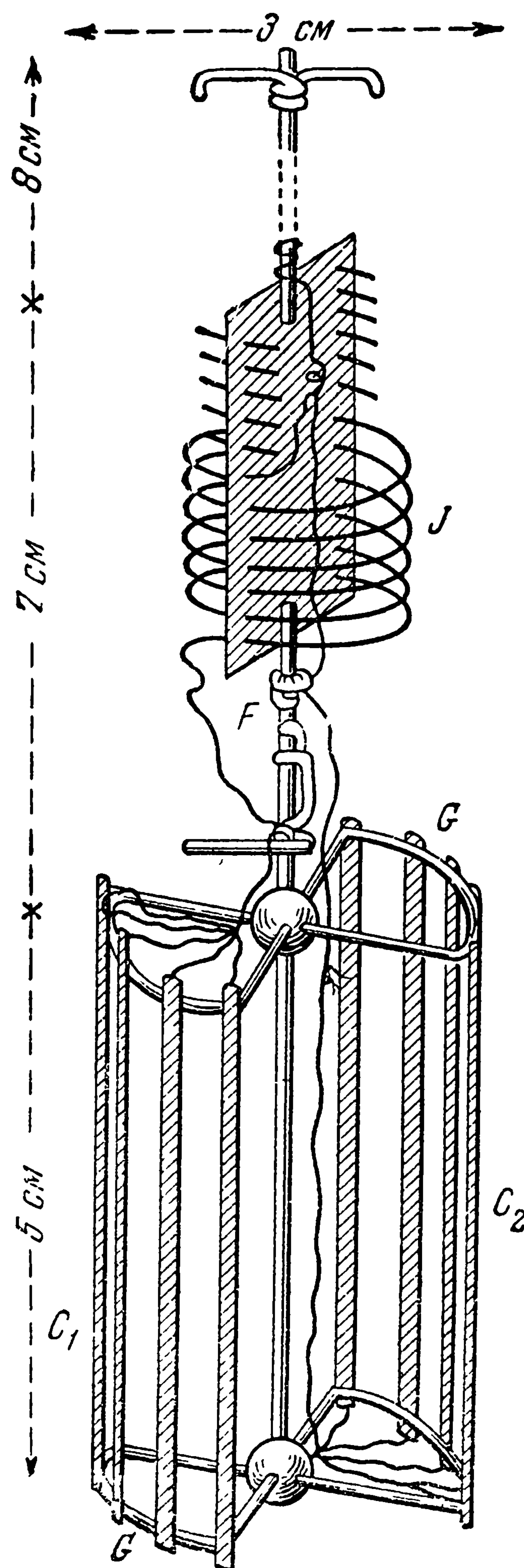


Рис. 5

ширины, 0,01 *мм* толщины, по пяти с каждой стороны), натянутых между стеклянными рамками *G*, *G*. Для изменения длины волны этого резонатора в пределах от $\lambda_1 = 280$ до $\lambda_2 = 440$ *см* проволока в верхней части соленоида перестригалась, число оборотов соленоида уменьшалось удалением некоторых из них или увеличивалось прибавлением новых

слоев, и затем свободные концы загибались и припаивались друг к другу по возможности близко от оси вращения, для того чтобы момент инерции оставался без заметного изменения.

Общий вес этого резонатора был 0,8 *г*.

Искровой микрометр F, необходимый для определения длины волны резонатора, был устроен и употреблялся так же, как при магнитном резонаторе (3).

Из расположения соленоида видно, что магнитная слагающая электрического колебания не может вызвать сил, вращающих крутильную нить: только электрические силы, действуя на накопленные на квадрантах заряды, могут поворачивать резонатор. Во время исследования этих сил резонатор помещался между пластинами электрического вибратора (5) так, что плоскость, проходящая через ось вращения и делящая квадранты C_1, C_2 пополам, составляла угол, близкий к 45° с линиями сил электрического поля вибратора; при таком расположении приборов магнитная сила колебания, не действующая на резонатор пондеромоторно, не могла и возбуждать его. Резонатор находится таким образом под действием исключительно электрических сил.

Этот резонатор мы можем уподобить стрелке квадрантэлектрометра, половины которой связаны друг с другом не непосредственно, а проводником с достаточной самоиндукций, благодаря чему вся система получает определенный период колебания.

7. *Электрический индикатор* представлял собою короткую стрелку электрометра, помещенную между двумя проволоками, связанными с пластинами P_1 и P_2 электрического вибратора (5) и подвешенную на крутильной нити. Прибор представляет собою, следовательно, обыкновенный электрометр.

8. *Зеркальный отсчет*. Так как при наблюдениях необходимо отсчитывать отклонение резонатора и индикатора одновременно, то этот отсчет проводился при помощи одной трубы: труба была установлена в плоскости крутильных нитей так, что зеркало при нити резонатора было расположено несколько выше, а зеркало индикатора — несколько ниже оптической оси трубы. В положении равновесия нормали обоих зеркал были слегка повернуты одна вправо, другая влево от оси трубы; поэтому можно было одновременно наблюдать две соответственно расположенные скалы; выгодно расположить их так, чтобы изображения делений почти соприкасались вдоль горизонтальной паутинки, поэтому на одной скале цифры должны быть вверху, на другой — внизу делений. Эти скалы, расположенные на широких планках, были вычернены вплоть до делений, отчего оба изображения в поле зрения трубы были видны вполне резко. Для избежания ошибок была выбрана различная нумерация (от 0 до 500 и от 500 до 1000).

Крутильные нити были вытянуты мною по способу Boys'а из кварца и были настолько тонки, что давали для индикаторов период половины

качания в 10 *сек*, а для резонаторов 12—18 *сек*, что, в свою очередь, позволяло с удобством наблюдать точки поворота одну за другой.

Для избежания воздушных течений как резонаторы, так и индикаторы были окружены двойными картонными защитами, которые, беспрепятственно пропуская электромагнитные колебания, хорошо задерживали движение воздуха. Чтобы не порвать нити, вставляя и вынимая резонатор, была устроена вилка, которая действовала подобно арретирующему приспособлению весов.

III. Измерения длины волн резонаторов

а. Предварительные исследования

Определение длины волны, соответствующей данному резонатору, после замечательного открытия так называемого «многократного резонанса» Sarasin et de la Rive [1] сводится к весьма простому способу определения узловых точек стоячей электромагнитной волны (по отсутствию возбуждения в резонаторе) и измерения расстояния между ними; это определение делается особенно удобным, как показали названные авторы, когда волна распространяется между двумя проволоками. Указанным методом пользовались при своих исследованиях Bjerknes [5] [2], Blondlot [16] [3] и Perot [17] [4], причем следуя H. Hertz, у [5], старались брать первичный проводник, близко настроенный к периоду резонатора.

На характерную ошибку, вытекающую из этого последнего обстоятельства, на неприложимость закона Sarasin et de la Rive, в непосредственной близости резонанса указывает Birkeland [6] [6]: когда длина волны, соответствующая вибратору, значительно меньше длины волны резонатора, то измеряемая вышеуказанным способом длина последней постоянна (она не отступает заметно от истинной величины ее, как увидим ниже); увеличивая постепенно длину волны первичного проводника, мы найдем, что измеряемая резонатором и долженствующая ему соответствовать длина волны понемногу уменьшается, достигает минимума, затем при переходе через резонанс быстро достигает максимума и при дальнейшем увеличении волны первичного проводника, уменьшаясь, стремится к той постоянной величине, которая наблюдалась и до перехода через резонанс; характер описываемого здесь изменения графически изображен на рис. 6: по абсциссе $P_1 P_2$ отложены длины волн первичного проводника, а

---

[1] E. Sarasin [14] et de la Rive [15]. Archives de Génève, (3) **23**, p. 113, 1890; **29**, p. 441, 1893; Beibl., **14**, p. 419, 1890; **17**, p. 967, 1893.
[2] V. Bjerknes. Wied. Ann., **44**, p. 558, 1891.
[3] R. Blondlot. Journ. de Phys., (2) **10**, p. 558, 1891.
[4] A. Perot. Compt. Rend., **114**, p. 1528, 1892.
[5] H. Hertz. Wied. Ann., **34**, p. 558, 1888.
[6] K. Birkeland. Wied. Ann., **47**, p. 611, 1892.

ординаты дают измеренную резонатором длину волны; таким образом, именно вблизи резонанса закон Sarasin et de la Rive'а о независимости измеряемой резонатором волны от периода первичного проводника не имеет места, и всякий случайный небольшой недочет в настройке вводит соответствующую ему ошибку в измерение волны резонатора.

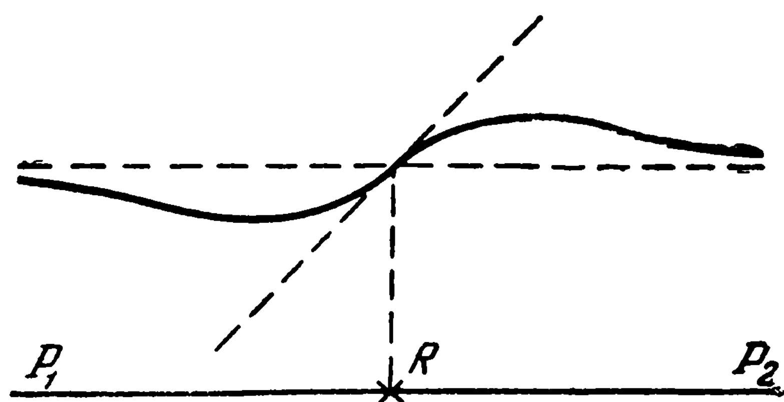


Рис. 6.

По Birkeland'у максимальное отступление может доходить до $\pm$ 0,04 λ, так как помянутый автор не указывает способа избавиться от этой ошибки, то по этому вопросу мною были предприняты исследования, которые показали, что величина этого отступления зависит от декремента затухания первичного проводника и делается тем меньше, чем ближе колебания первичного проводника подходят к движению апериодическому, соответствующему одному сильному толчку; вот почему я стремился увеличить этот декремент как тем, что вводил в путь тока первичного проводника достаточно большие сопротивления, так и тем, что на основании опытов Bjerknes'а[1], ставил коллекторные пластинки, связанные с проволоками, весьма близко к обкладкам первичного проводника; благодаря такому приему максимальное отступление упало до $\pm$0,003 λ, и от него легко было избавиться, делая определения при двух длинах волн первичного проводника, отличающихся от полного резонанса на $\pm$0,1 λ и выводя из них среднее.

Что касается до зависимости измеряемой резонатором длины волны от проволок, вдоль которых распространяются волны, то ее удалось обнаружить таким образом: две длинные (от 6 до 8λ) параллельные медные проволоки были связаны между собою как мостом широкой металлической пластиной (по ту сторону этого моста электромагнитные движения в проволоках были ничтожно малы, и мы можем, следовательно, принять, что около моста проволоки как бы оканчивались и были отрезаны от частей, лежащих за мостом); передвигая мост, можно было по произволу удлинять и укорачивать проволоки на небольшие отрезки (например, по 25 *см*).

Измерения длины волны резонатора дали величины непостоянные: увеличивая длину проволоки, мы замечаем сначала, что измеряемая длина волны уменьшается, достигает минимума, быстро переходит на максимум, потом снова уменьшается и т. д., периодически колеблясь в пределах около $\pm$ 0,03 λ; эти колебания изображены на рис. 7, причем по абсциссе L_1L_2 отнесены приросты длины проволок, а ординатам соответствуют измеренные длины волн резонатора.

[1] V. Bjerknes. Wied. Ann., 44, p. 524, 1891.

Та особенность, что одинаковые отступления повторяются на длине в полволны (как показано на рис. 7), указывает нам, что пертурбирующей причиной является волна, после того как она, пробежав один раз по проволоке, снова возвращается, отразившись у свободного (т. е. обращенного к первичному проводнику) конца системы; это действие отраженной волны мне удалось сделать безвредным, заставляя бежать ее не по медным, а по железным проволокам, в которых по исследованиям Birkeland'a[1], двигающаяся волна сильно затухает: отраженная волна, предварительно пробежав два раза вдоль железной проволоки, настолько слабеет, что не может уже произвести какое-либо пертурбирующее действие; действительно, указанное выше периодическое колебание сделалось в десять раз меньше (т. е. $\pm 0{,}003\ \lambda$), т. е. стало ниже погрешности отдельного наблюдения.

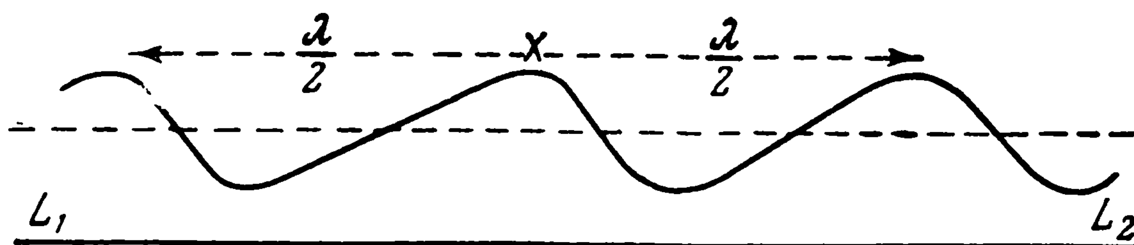


Рис. 7

Результаты этих предварительных исследований указывают, что при тщательных определениях длины волн резонаторов методы, употребленные другими наблюдателями, недостаточны и могут случайно привести к систематическим ошибкам до $\pm 0{,}05\ \lambda$, тогда как указанный мною прием дает возможность измерять указанную величину до $\pm 0{,}003\ \lambda$ свободною от систематических ошибок.

в. Окончательное расположение

Первичный проводник состоял (рис. 8) из двух параллельных медных проводников (длина 50 *см*, расстояние между проводниками 6 *см*), вдоль которых можно было перемещать искровый промежуток F, погруженный в вазелиновое масло[2]; трубки C_1 и C_2 со столбиками воды были включены между ним и индукторием для избежания слишком теплых искр[3]. С помощью двух сопротивлений из раствора медного купороса W_1 и W_2, около 150 *ом* каждое, медные проводники были соединены с обкладками S_1 и S_2 (диски $D = 30$ *см*); перед каждой из этих обкладок находилось по металлической пластинке P_1 и P_2, от которых шли железные проволоки длиной в 20 *м* и толщиной в 0,6 *мм*, натянутые параллельно на расстоянии 6 *см*; железные проволоки оканчивались медными проволо-

---

[1] K. Birkeland. Compt. rend., **116**, p. 93, 1893; Beibl., **17**, p. 1099, 1893.

[2] Sarasin et de la Rive. Compt. rend., **115**, p. 439, 1892; Arch. de Geneve, (**3**) **28**, p. 3 6, 1892; Beibl., **17**, p. 597, 1893.

[3] Töpler [18]. Wied. Ann., **46**, p. 467, 1892.

ками той же толщины и длиной в 8 *м*, свободные концы которых были соединены друг с другом; вдоль этих последних и определялись длины волн резонаторов. Вся система проводников находилась по возможности далеко от стены (по меньшей мере 0,8 *м*); во избежание «внутренних» отражений, которые, как показал V. Geitler [19] [1], могут быть значительны, параллелизм проволок проверялся с особой тщательностью.

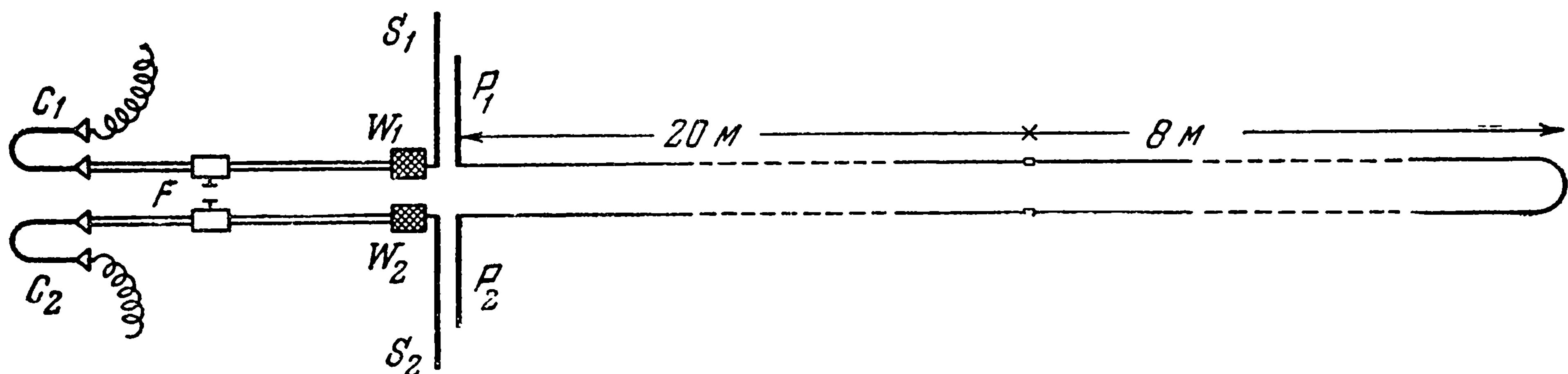


Рис. 8

Чтобы при повторных измерениях избежать влияния каких-либо привычных меток, масштаб был устроен в виде невидимых при слабом освещении проволочных колец, размещенных через каждые 50 *см* на одной из проволок. Расстояния между этими метками и местами установок точно определялись при помощи деревянного масштаба.

Длины волн, соответствующие описанному выше первичному проводнику при различных положениях его искрового промежутка, были определены при помощи настроенного с ним в унисон вспомогательного резонатора [2] и лежали в пределах от $\lambda_1 = 250$ до $\lambda_2 = 460$ *см*. Графическая табличка позволяла быстро находить то положение искрового промежутка, для которого длина волны первичного проводника имела необходимую при данном определении величину.

Длина волны резонатора измерялась расстоянием между первым и третьим узлом; самый узел определялся тем, что наблюдалось погасание искры в резонаторе при приближении к узлу с той и с другой стороны: обе точки отмечались маленькими подвижными резиновыми метками и определялась середина между ними. Из нескольких сот наблюдений можно было установить, что этот «темный ход» [3] резонатора нельзя делать очень малым — самая подходящая для него величина оказалась $0{,}15\ \lambda$. При некотором навыке легко получать замечательную точность: так, отдельные отсчеты обыкновенно не отличаются друг от друга больше чем на $\pm 0{,}005\,\lambda$.

---

[1] J. v. Geitler. Wied. Ann., 49, p. 195, 1893.
[2] Bjerknes, l. c. p. 78.
[3] Blondlot, l. c. p. 558.

Определение длины волны резонатора состоит в следующем: сначала эту длину определяют приблизительно при какой-нибудь длине волны первичного проводника и, пользуясь этим указанием, переходят к измерению этой длины при длинах волн первичного проводника на 0,1 λ большей или меньшей против измеряемой волны; для каждого случая расстояние между узлами определяется по четыре раза, и затем выводят среднее из этих наблюдений.

Найденная указанным способом длина волны соответствует резонатору при совершенно определенном положении микрометра; ввиду малых электростатических емкостей резонаторов можно предположить, что та заранее неопределимая емкость, которую представляли собою два весьма близких друг от друга ушка микрометра, в заметной степени изменяет период резонатора; тщательные опыты показали, что весьма значительные изменения в длине микрометрической искры остаются без влияния на измеряемую длину волны. Мы можем, следовательно, допустить, что еще больше увеличивая это микрометрическое расстояние (2—3 *мм*), как то необходимо при определении пондеромоторных сил, мы уменьшаем периоды резонаторов на ничтожную величину, что не может никаким образом отозваться на характере наблюдаемых явлений.

IV. Наблюдения

Приступая к изучению пондеромоторных сил, я предварительно убедился, что отношение отклонений резонатора и индикатора есть величина постоянная и не зависит ни от величины искры в первичном проводнике, ни от расстояния его от вибратора. Электростатические влияния (при чрезмерно большом искровом перерыве в первичном проводнике) были настолько малы, что никакого заметного отклонения не вызывали.

Каждое единичное наблюдение слагалось из определения длины волны резонатора, которое проводилось указанным выше способом, и из определения крутильной силы; эта последняя определялась следующим образом: резонатор подвешивался на кварцевую нить крутильного прибора и после некоторого колебания успокаивался; тогда проводился отсчет нулевого положения резонатора и индикатора и замыкался ток, возбуждающий индукторий; через 10 *сек*, с десятым ударом метронома, ток прерывался и наблюдались точки поворота как индикатора, так и резонатора. Указанное наблюдение было повторяемо восемь раз подряд, и отсюда выводилась средняя величина.

Чтобы иллюстрировать эти отдельные измерения, я позволю себе привести здесь два протокола записей (табл. 1, 2), относящихся к двум приведенным ниже таблицам (табл. 3, 4).

В этих протоколах

P — длина волны в *см* первичного проводника, при которой проводилось измерение λ резонатора;

Таблица 1

Магнитный резонатор

(наблюдение № 3 из табл. 3)

P	λ	J	R	$R_{j=180}$	P	λ	J	R	$R_{j=180}$
	333	184	+8,3	+8,1		331	172	8,0	8,3
	329	183	7,2	7,1	360	334	186	7,2	7,0
300	329	180	7,7	7,7		333	178	+7,6	+7,5
	332	185	7,7	7,5		328			+7,6
	331±2	186	7,5	7,3		331,5±2			

$\lambda = 331$ *см* ± 2; $R_{j=180} = +7{,}6 \pm 0{,}4$.

Таблица 2

Электрический резонатор

(наблюдение № 3 из табл. 4)

P	λ	J	R	$R_{j=40}$	P	λ	J	R	$R_{j=40}$
	372	32	—14,5	—18,1		375	37	14,0	15,0
	372	34	13,5	15,4	415	378	43	16,9	14,9
335	377	40	16,7	16,7		379	36	—13,0	—14,6
	373	41	16,5	16,1		375			—15,7
	374±2	38	14,5	15,3		376,5±2			

$\lambda = 375$ *см* ± 2; $R_{j=40} = 15{,}7 \pm 0{,}9$

λ — наблюдаемое расстояние между первым и третьим узлами при определении длины волны резонатора;

J — наблюдаемое отклонение индикатора в делениях шкалы;

R — наблюдаемое отклонение резонатора в делениях шкалы; при определении крутильных сил; о знаке см. ниже;

$R_{j=180}$ и $R_{j=40}$ — отклонение резонатора, приведенное к отклонению индикатора в 180 и в 40 делений шкалы.

Из многочисленных серий наблюдений я считаю достаточным привести только две, из которых одна относится к магнитному, а другая к электрическому резонатору, ввиду того что все сделанные мною наблюдения представляют тождественный ход явления.

В приведенных ниже табл. 3, 4 № обозначает номер наблюдения, а λ и R имеют описанное выше значение. Что касается знака при R, то (+) обозначает такое вращение, при котором угол между силовыми линиями

Таблица 3

Магнитный резонатор
(рис. 9)

№	λ	$R_{j=180}$
5	301±2	+3,4±0,4
4	311±2	+3,8±0,3
3	331±2	+7,6±0,4
2	340±2,5	+14,8±1,0
8	351±2	+52,0±3,0
1	371±1,5	—18,8±0,6
7	389±2	—8,5±0,2
6	414±2,5	—4,5±0,3

Длина волны магнитного вибратора $v = 358$ *см* ± 6

Таблица 4

Электрический резонатор
(рис 10)

№	λ	$R_{j=40}$
7	283±1	+ 7,6±1,3
4	323±1,5	+14,6±0,5
6	333±1,5	+19,5±2,4
5	359±2	—22,6±1,4
3	376±2	—15,7±0,9
2	389±1,5	— 8,1±0,8
1	418±1,5	— 4,7±0,5

Длина волны электрического вибратора $v = 346$ *см* ±5.

поля резонатора и поля вибратора стремится уменьшиться; таким образом, знак (+) соответствует притяжению между силовыми линиями, тогда как знак (—) соответствует вращению в обратную сторону, т. е. отталкиванию между ними. Рис. 9 и 10 представляют графическое изображение пондеромоторных сил; по абсциссам отнесены λ, а по ординатам — R, v обозначает длину волны вибратора.

Результаты приведенных выше наблюдений можно формулировать таким образом:

1) законы подеромоторного действия волн на магнитные и электрические резонаторы тождественны;

2) когда резонаторы настроены выше, то падающая на них волна вращает их так, чтобы возбуждение их увеличивалось; когда резонаторы настроены ниже, то вращение влечет за собой уменьшение возбуждения;

3) наибольшие величины этих противоположных сил имеют место в непосредственной близости резонанса.

Все попытки проследить явление при постепенном переходе через резонанс не привели к желаемому результату: в этой области возбуждение резонатора весьма сильно и тонкая проволока их кругов самоиндукции настолько сильно разогревается, что образовавшиеся при этом воздушные течения заставляли резонатор неправильно колебаться и совершенно маскировали те небольшие пондеромоторные силы электрических колебаний, которые имеют место при переходе через ноль.

С магнитным резонатором я провел целый ряд опытов при самых разнообразных условиях. Так, вибратор настраивался выше или ниже возбуждающего первичного проводника; максимальные величины отклонений передвигались соответственно изменившейся длине волны вибратора.

Когда в вибратор было введено ответвление W (см. рис. 2), благодаря чему декремент его затухания значительно увеличился, то отклонение как резонатора, так и индикатора сильно уменьшилось, но отношение их осталось без изменения.

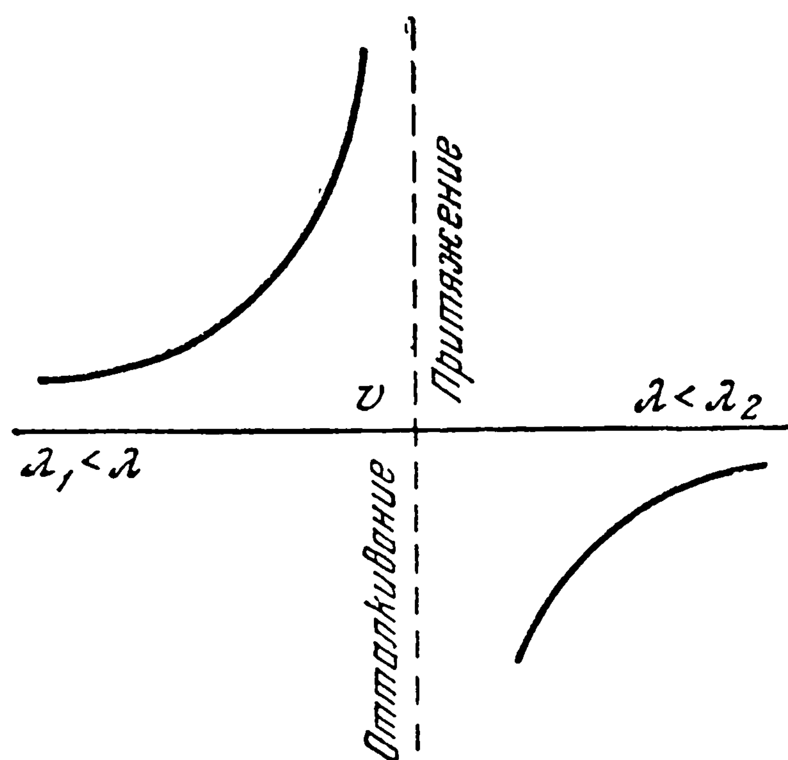


Рис. 9

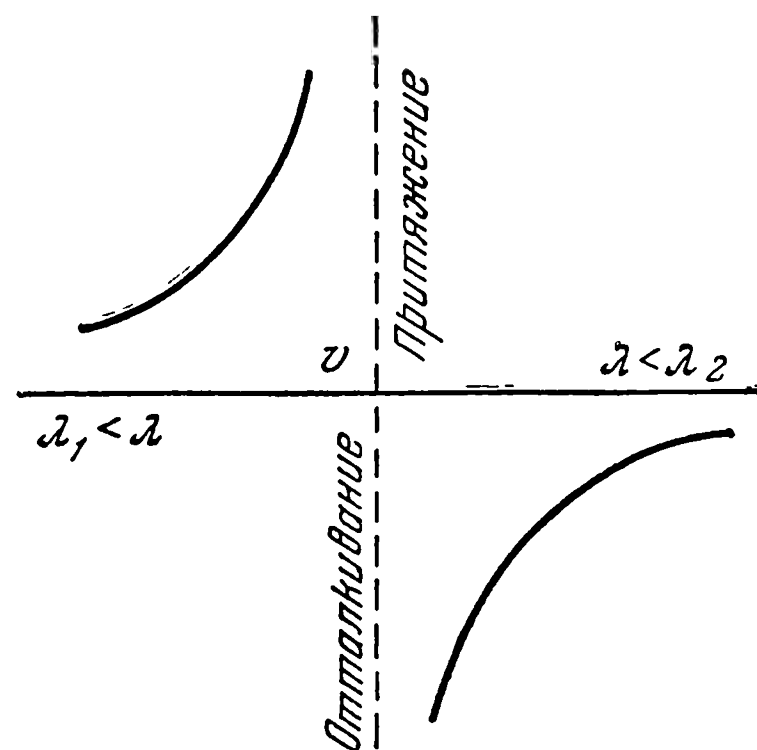


Рис. 10

Опыты, которые я делал раньше с приборами, гораздо менее совершенными (и здесь не описанными), дали те же самые результаты.

Для точного количественного исследования явления, в особенности вблизи резонанса, потребуются, по-видимому, приборы, совершенно отличные от тех, которые были в моем распоряжении.

V. Теория пондеромоторного действия электромагнитных волн на резонаторы

Механическое действие волн на резонатор в зависимости от собственного периода резонатора можно вычислить, если сделать два предположения: первое относительно закона возбуждения резонатора и второе относительно механического взаимодействия возбуждающего и возбужденного движения.

Ниже мы рассмотрим вычисления для случая, когда возбуждающее движение $f(t)$ представляет затухающее синусоидальное колебание вида:

$$(A) \qquad f(t) = a_0 e^{-\alpha t} \cos at,$$

где a_0 — начальная амплитуда,
a — пропорционально числу колебания,
α — затухание.

Если мы предположим, как это делает Bjerknes [1], что возбуждение электромагнитного резонатора следует тем же законам, как и затухающее колебание маятника под действием периодической затухающей силы, то это возбуждение может быть представлено как сложное, состоящее из принужденного колебания и свободного — собственного, числа колебаний которого и затухание характеризуются самим резонатором. В нашем случае это движение $\varphi(t)$:

$$(B) \qquad \varphi(t) = Ae^{-\alpha t}\sin(at + a') + Be^{-\beta t}\sin(bt + b').$$

Здесь постоянные имеют следующие значения:

$$A = \frac{a_0 a^2}{\sqrt{[b^2+(\alpha-\beta^2)^2-a^2]^2+4a^2(\alpha-\beta)^2}};$$

$$a' = \operatorname{arctg}\frac{1}{2a}\cdot\frac{a^2-(\alpha-\beta)^2-b^2}{\alpha-\beta};$$

$$B = -A\frac{+\sqrt{b^2+(\alpha-\beta)^2}}{b};$$

$$b' = \operatorname{arctg}\frac{b}{a^2+(\alpha-\beta)^2+b^2}\cdot\frac{a^2-(\alpha-\beta)^2-b^2}{\alpha-\beta}.$$

Амплитуда A имеет тот же знак, что $\beta-\alpha$, а эпохи[2] a' и b' лежат между $+\frac{\pi}{2}$ и $-\frac{\pi}{2}$.

Предположим далее, что импульс dK механической силы для любого элемента времени dt пропорционален произведению возбуждающего и возбужденного движения, другими словами: пусть имеют место законы Кулона и Ампера. Итак, положим

$$(C) \qquad dK = f(t)\,\varphi(t)\,dt.$$

Если мы будем под словом «движение» разуметь магнитное и электрическое состояние поляризации среды, определяемое возбуждающим и возбужденным колебанием, то импульс dK будет обозначать притягательную силу, так как мы считаем две поляризации одинаково направленными когда их силовые линии образуют острый угол, а действующие механические силы соответствуют тогда притяжению. Едва ли стоит указывать на то, что мы получим те же результаты, если будем рассматривать вместо поляризации явления индукции и ход изменения электрических зарядов резонатора.

[1] V. Bjerknes, l. c. p. 81.

[2] Т. е. соответствующие моменты времени.—*Прим. ред.*

Если требуется вычислить полный импульс за промежуток времени, в течение которого колебания затухают до исчезающе малой доли своей первоначальной величины, то можно распространить интеграцию до $t = \infty$, что облегчает вычисления.

$$(D) \qquad K = \int_0^\infty f(t)\,\varphi(t)\,dt.$$

Величина K прямо пропорциональна притягательной силе.

Интеграция без труда приводится к интегралам Коши и дает

$$(1) \qquad K = \frac{Aa_0}{2}\left[\frac{\sin a'}{2\alpha} + \frac{\alpha \sin a' + a \cos a'}{2(\alpha^2 + a^2)}\right] + \frac{Ba_0}{2}\left[\frac{(\alpha+\beta)\sin b' + (a - b)\cos b'}{(\alpha+\beta)^2 + (a-b)^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{(\alpha+\beta)\sin b' + (a+b)\cos b'}{(\alpha+\beta)^2 + (a+b)^2}\right].$$

Это выражение существенно упрощается, если мы ограничимся небольшими отклонениями от резонанса и предположим, что затухания α и β малы. Тогда можно пренебречь членами, которые содержат в знаменателе a^2 или $(a + b)^2$, и положить

$$B = -A;$$

$$\operatorname{tg} b' = \operatorname{tg} a'.$$

После соответствующих преобразований получаем

$$(2) \qquad K' = \frac{a_0^2 (b^2 - a^2) a^2}{(b^2 - a^2) + 4a^2(\alpha - \beta)^2} \cdot \left[\frac{1}{2\alpha} - \frac{2\beta}{(\alpha+\beta)^2 + (b-a)^2}\right]$$

В непосредственной близости резонанса, где можно $b^2 - a^2$ заменить через $2a(b - a)$, выражение (2) может быть еще более упрощено; именно

$$(3a) \qquad K'_R = \frac{a_0^2}{4\alpha} \frac{a(b-a)}{(\alpha+\beta)^2 + (b-a)^2}.$$

Если же мы будем отвлекаться от области, непосредственно прилегающей к резонансу, то $b - a$ велико по сравнению с α и β и выражение (2) можно упростить другим путем.

$$(3b) \qquad K_r^1 = \frac{a_0^2}{4\alpha} \frac{2}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1}.$$

Оба уравнения (3a) и (3b) можно написать несколько иначе, если ввести количество энергии, падающей на резонатор. Для каждого элемента времени dt количество энергии dE, проходящее через среду, про-

порционально $[f(t)]^2 dt$; количество энергии E, попавшей за все время на резонатор [1],

$$E = a_0^2 \int_0^\infty e^{-2\alpha t} \cos^2 at\, dt = \frac{a_0^2}{4\alpha}\,.$$

Поэтому можно написать

(I) $$K_R = E \frac{a(b-a)}{(\alpha+\beta)^2 + (b-a)^2}\,;$$

(II) $$K_r = E \frac{2}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 1}\,.$$

Рис. 11 иллюстрирует ход изменения механической силы, действующей на резонатор для случая, когда возбуждающее колебание постоянно, а период и затухание резонатора переменны. Положительные ординаты соответствуют притяжению, отрицательные — отталкиванию.

Кривые рис. 11 охватывают область $(b-a) = \pm 10\alpha$.

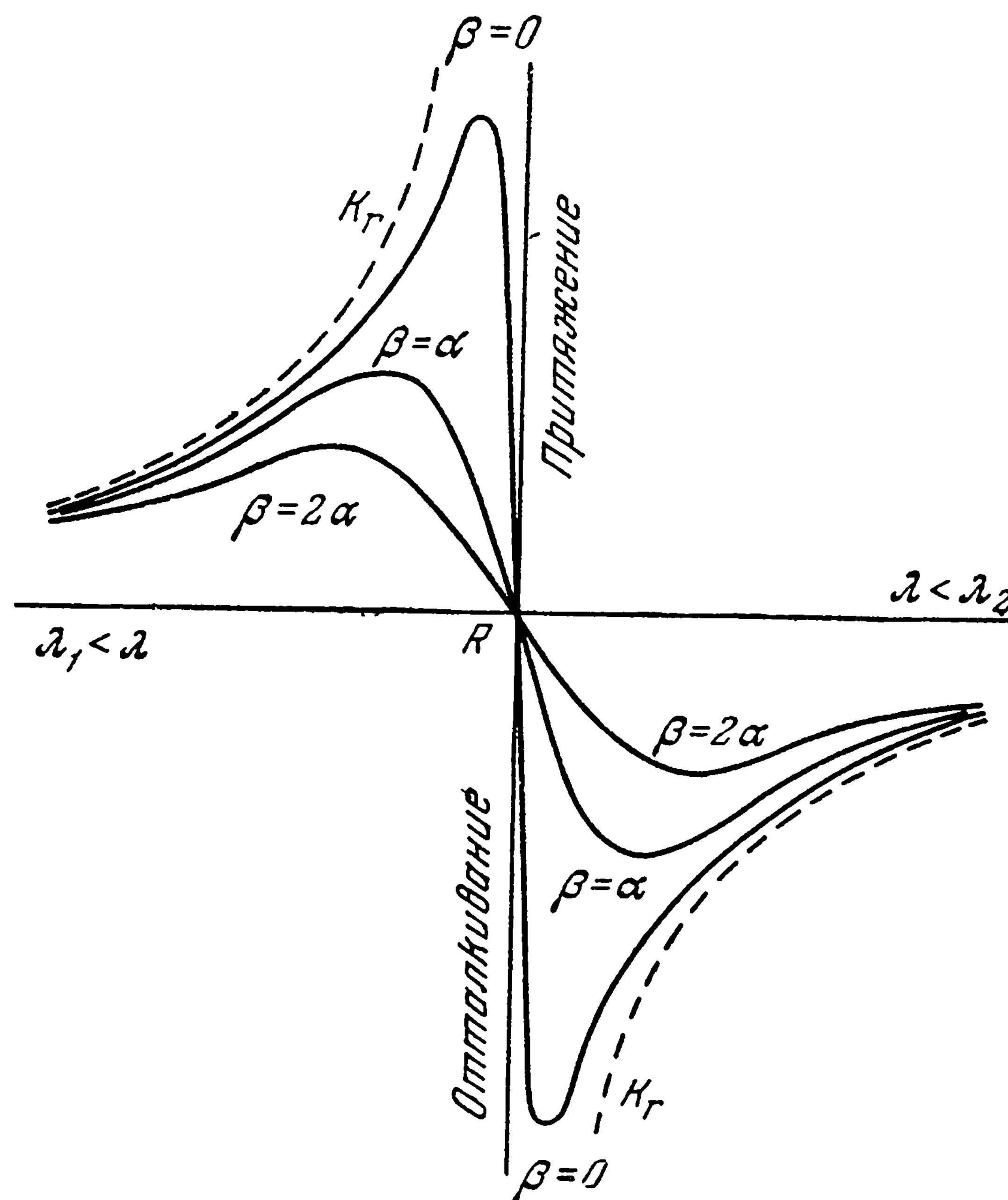


Рис. 11.

[1] См. V. Bjerknes, l. c. p. 84.

Чтобы рис. 11 находился в соответствии с рис. 9 и 10, на оси абсцисс отложены не числа колебаний, а соответствующие им обратные величины, т. е. длины волн, которые на диаграмме возрастают слева направо.

Результаты можно формулировать следующим образом:

1) механическое действие возбуждающей волны на резонатор прямо пропорционально количеству падающей на него энергии и зависит только от отношения чисел колебания, а не от их абсолютных величин;

2) выше настроенный резонатор притягивается возбуждающим его источником колебаний, ниже настроенный — отталкивается; максимумы этих противоположных действий лежат в непосредственном соседстве с резонансом и непрерывно переходят друг в друга; по отношению к области полного резонанса ход явления симметричен;

3) наибольшие величины механических сил лежат при $(b - a) = \pm(\alpha + \beta)$ и достигают при прочих равных условиях значений, обратно пропорциональных $\alpha + \beta$.

Нетрудно также вычислить ход изменения механических сил для случая, когда в качестве источника колебаний служит вибратор, возбуждаемый первичным проводником; при этом, помимо слабо затухающих колебаний вибратора с числом колебаний a и затуханием α, надо считаться с колебаниями первичного проводника, которые быстро затухают, благодаря большому затуханию γ возбудителя; вследствие этих колебаний надо принимать в расчет в выражениях (I) и (II) поправочные члены, величины которых относятся к K как α и γ, а так как α по сравнению с γ очень мало (по Bjerknes'у[1], отношение $\frac{\alpha}{\gamma}$ едва достигает одной сотой), то в первом приближении уравнения (I) и (II) приложимы и к нашим измерениям.

Следовательно, лежащие в основе приведенных вычислений предположения приводят к результатам, согласным с наблюдениями, а поэтому мы можем считать эти предположения правильными.

VI. Заключение

Подводя итог, мы приходим к следующим выводам.

1. Закон механического действия электромагнитного колебания на резонатор может быть установлен из опыта и оказывается тождественным как для электрической, так и для магнитной слагающей колебания.

2. Наблюдаемые явления могут быть без труда объяснены, если мы сделаем следующие предположения:

a) возбуждение электрического резонатора следует, по V. Bjerknes'у, законам, которым подчиняются все упругие колебания;

b) законы Кулона и Ампера сохраняют силу и для электрических колебаний.

[1] V. Bjerknes, l. c. p. 89.

Если мы станем на точку зрения электромагнитной теории света, если мы сделаем допущение, что волны Герца суть световые волны большого периода, то мы можем наши опыты рассматривать как попытку на чрезмерно больших схематических моделях молекул в основных чертах исследовать законы тех молекулярных сил, которые обусловлены взаимным лучеиспусканием молекул.

Глава II

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

Классические исследования C. A. Bjerknes'a [9] механического взаимодействия двух шаров, независимо колеблющихся (пульсирующих и осциллирующих) в несжимаемой жидкости, иллюстрированные им замечательными опытами [1], знакомят нас с рядом обратных аналогий между указанными гидродинамическими силами и известными пондеромоторными силами в случае статической электрической или магнитной поляризации. Мне удалось дополнить исследования C. A. Bjerknes'a изучением того случая, когда один из шаров колеблется не независимо, а представляет собой резонатор, возбуждаемый движением окружающей его жидкости, т. е. исследовать вопрос, по-существу тождественный с тем, который был мною разобран для электромагнитных колебаний; приступая к опытам, я ожидал встретить аналогию между указанными двумя классами явлений, и эта аналогия оказалась прямой, т. е. законы зависимости пондеромоторных сил от резонанса оказались тождественными с законами для электромагнитных колебаний. Свое исследование я ограничил осциллирующими резонаторами и изучал явление притяжения и отталкивания.

I. Расположение опытов

Источником колебаний служил в моих опытах шарик, укрепленный на стержне, связанном с колеблющим его электродвигателем. Резонатором служил упругий маятник, состоящий из металлического шарика на плоской стальной пружине (подобным резонатором для совсем других целей пользовался уже C. A. Bjerknes [2]). Оба шарика находились в воде.

Для того чтобы наблюдать пондеромоторные силы, которые обусловлены только колебанием шариков, независимо от всех других сил, которые испытывают тела вблизи колеблющегося шарика, было взято тело, тожде-

---

[1] C. A. Bjerknes. Exner's Rep., **19**, p. 289, 1883.
[2] C. A. Bjerknes, l. c. p. 309.

ственное по своему внешнему виду с резонатором, но не имеющее его периода колебания; резонатор и компенсирующее его тело накрепко соединились между собой, располагались симметрично относительно осциллирующего шарика и подвешивались на крутильную проволоку. Углом кручения измерялась разность двух гидродинамических сил, которая обусловливалась исключительно колебанием резонатора и была независима от других внешних особенностей резонатора.

По отношению к осциллирующему шарику резонатор располагался как в направлении поляры, так и в экваториальной плоскости, что давало возможность исследовать интересующие нас силы как для продольных, так и для поперечных колебаний.

В отдельных сериях наблюдений самый резонатор, а также амплитуда осциллирующего шарика оставались без изменения; силы, крутящие проволоку подвеса, измерялись для различного числа колебаний осциллирующего шарика, и таким образом определялась зависимость ее от резонанса.

II. Приборы

1. *Осциллирующий шарик* O (диаметр равен 30 *мм*) приводился в движение электродвигателем E, как то показано на рис. 12. Он находился на 8 *см* под поверхностью воды и в зависимости от расстояния пальца Z или Z' от оси вращения осциллировал с амплитудой в 23 или 11 *мм*.

2. *Регулирование скорости вращения электродвигателя*, которое обеспечивало полное постоянство периода колебания и позволяло изменять этот период на заданные, произвольно малые интервалы, достигалось посредством камертонного прерывателя.

На рис. 13 показано расположение приборов. Мотор постоянного тока E (давший при цепном соединении и 100*в* $\frac{1}{4}$ *л. с.*) присоединялся к проводам городского тока как шунтовая динамо; для регулирования скорости в главную цепь включалось сопротивление $r + r'$, которое подбиралось так, что число оборотов было немного менее, а при коротком замыкании части r' — несколько более того, которое требовалось.

Цепь короткого замыкания в двух местах периодически замыкалась и размыкалась: первый контакт C производил камертон S, приводимый в движение электромагнитом, а второй — стальная пружина F, которая прижималась к укрепленному на оси мотора кресту K (для ясности чертежа на рис. 13 крест K изображен внизу отдельно от мотора). Когда установится требуемое число оборотов (причем число оборотов мотора ровно в четыре раза меньше числа колебаний регулирующего камертона), происходил следующий процесс: сначала устанавливает контакт пружина F; она скользит некоторое время по зубцу креста, пока камертон S не замкнет накоротко сопротивление r'; тогда мотор начинает работать при

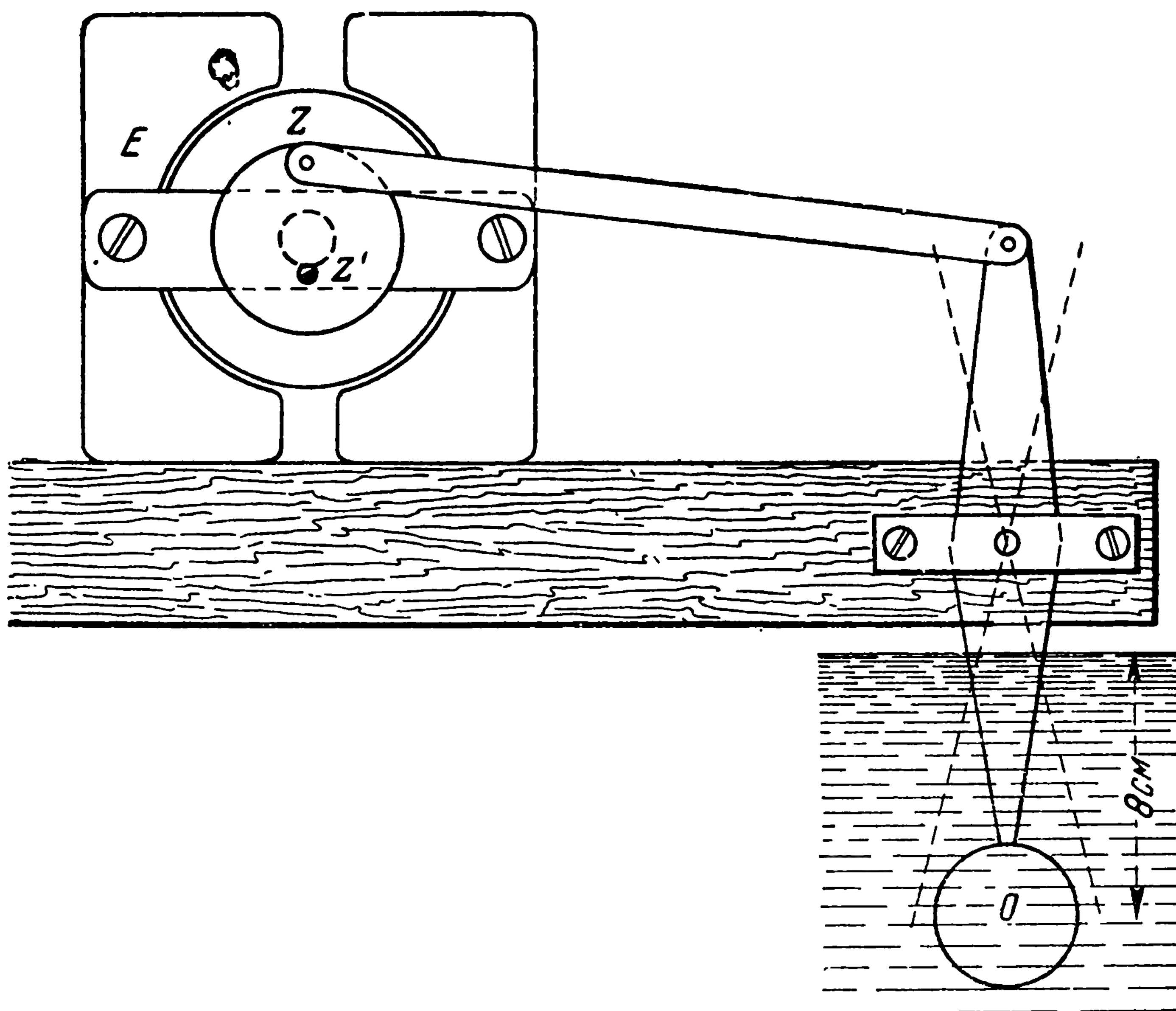


Рис. 12

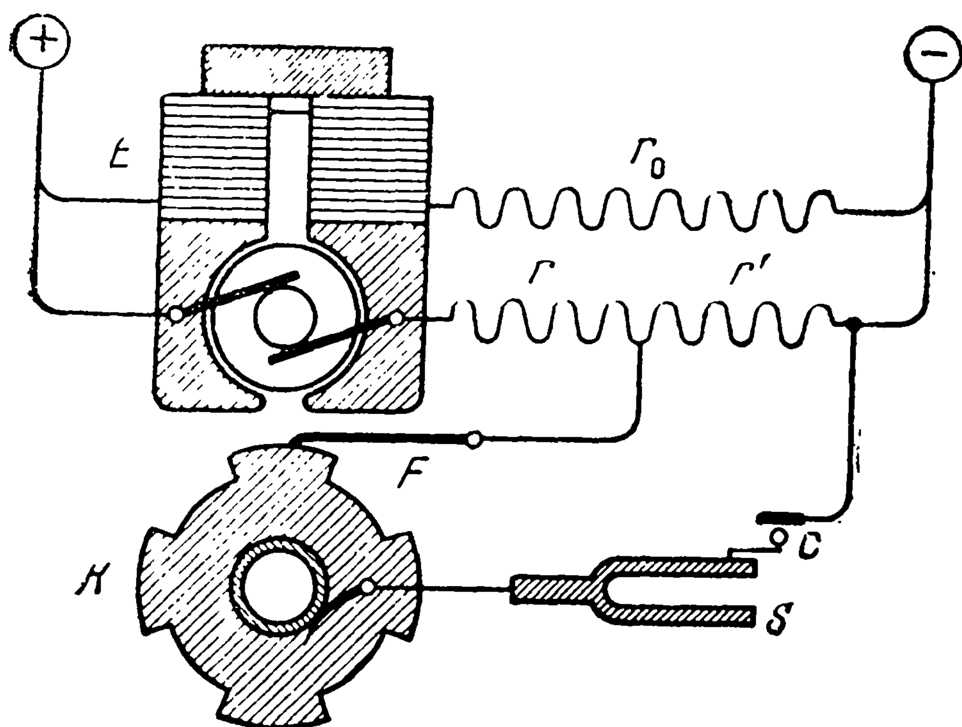


Рис. 13

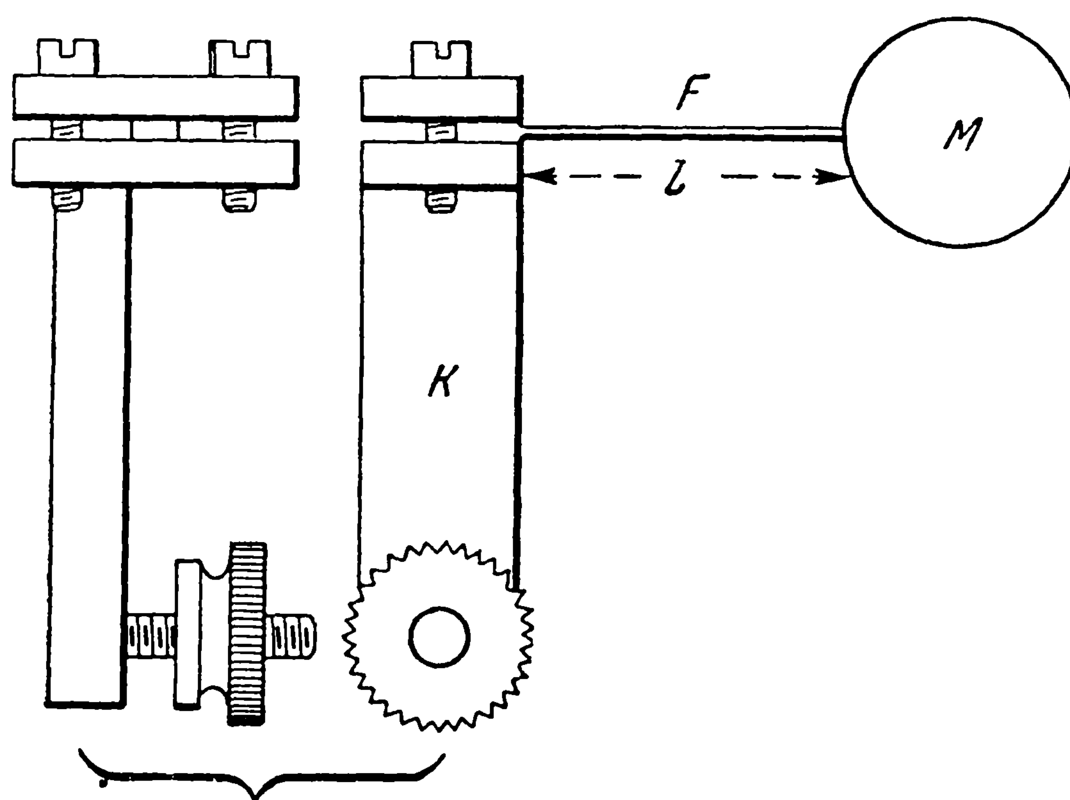


Рис. 14

большей силэ тока, но только до тех пор, пока пружина не сойдет с зубца и не прервет цепь короткого замыкания; после этого и камертон размыкает цепь, в которой уже нет тока [1], и процесс начинается заново.

Если каким-нибудь образом нагрузка мотора изменится, например уменьшится, то ход мотора несколько ускорится, в то время как ход камертона останется без изменений, пружина коснется зубца раньше, но раньше и сойдет с него; промежуток времени, в течение которого ток проходит в цепи короткого замыкания, будет меньше, и соответственно начнет убавляться мощность мотора до тех пор, пока число оборотов не сделается постоянным и ровно в четыре раза меньшим, чем число колебаний камертона; ясно, что мотор регулируется смещением фазы по отношению к камертону.

В качестве постоянной нагрузки для мотора служила маленькая динамомашина, замкнутая через соответственно выбранное сопротивление, что оказалось весьма удобным [2].

Постоянство числа оборотов мотора можно было контролировать как акустически, по унисону камертона с тоном пружины, так и стробоскопическим путем, визируя искру размыкания на кресте K, отраженную в зеркале камертона [3].

Если слегка затормозить мотор пальцем и потом отпустить, то в течение короткого промежутка времени угловая скорость колеблется около постоянной величины, что сразу заметно по колебанию высоты тона и по движению изображения искры. Если не влиять на ход мотора намеренно, то угловая скорость часами остается постоянной.

Период колебания шарика изменялся тем, что ножки камертона нагружались передвижными грузами, и соответственно регулировалось сопротивление $r + r'$. Для измерения периода колебания к мотору на продолжительный срок присоединялся счетчик оборотов; при помощи секундомера определялось время, в течение которого мотор совершал определенное число оборотов.

3. *Резонатор*, с которым были сделаны главные опыты, состоял (рис. 14) из алюминиевого шарика M ($D = 30$ *мм*), укрепленного на конце плоской стальной пружины F (ширина $b = 2{,}1$ *мм*, толщина $d = 0{,}75$ *мм*; свободная длина $l = 28$ *мм*); другой конец был укреплен в показанной на чертеже клемме, при помощи которой резонатор привинчивается к описанному ниже крутильному прибору.

Для того чтобы проверить полученные результаты, были сделаны опыты также с другим резонатором, шарик которого был медный ($D' = 15$ *мм*),

[1] Обращаю внимание на то, что при выбранном расположении камертон замыкает довольно значительный ток, но не прерывает его, почему контакт (платина) не портится и не вызывает изменений хода камертона.

[2] Если мотор не нагружать, то сильно сказывается чрезвычайная изменчивость малых сопротивлений трения, и тогда почти невозможно достигнуть правильного хода.

[3] Камертон ($N = 64$ приблизительно) был от Дюбоска в Париже и был сконструирован для фигур Лиссажу.

а плоская стальная пружина была шире ($b' = 11$; $d' = 0{,}5$, $l' = 37$ *мм*); этот резонатор укреплялся при помощи той же клеммы.

4. *Компенсирующее тело*, которое соответствовало по размерам резонатору, состояло из пробкового шарика, поверхность которого была покрыта гладким слоем сургуча; этот шарик укреплялся на гораздо более жесткой (менее гибкой) пружине; он привинчивался к крутильному прибору при помощи такой же клеммы, как и резонатор.

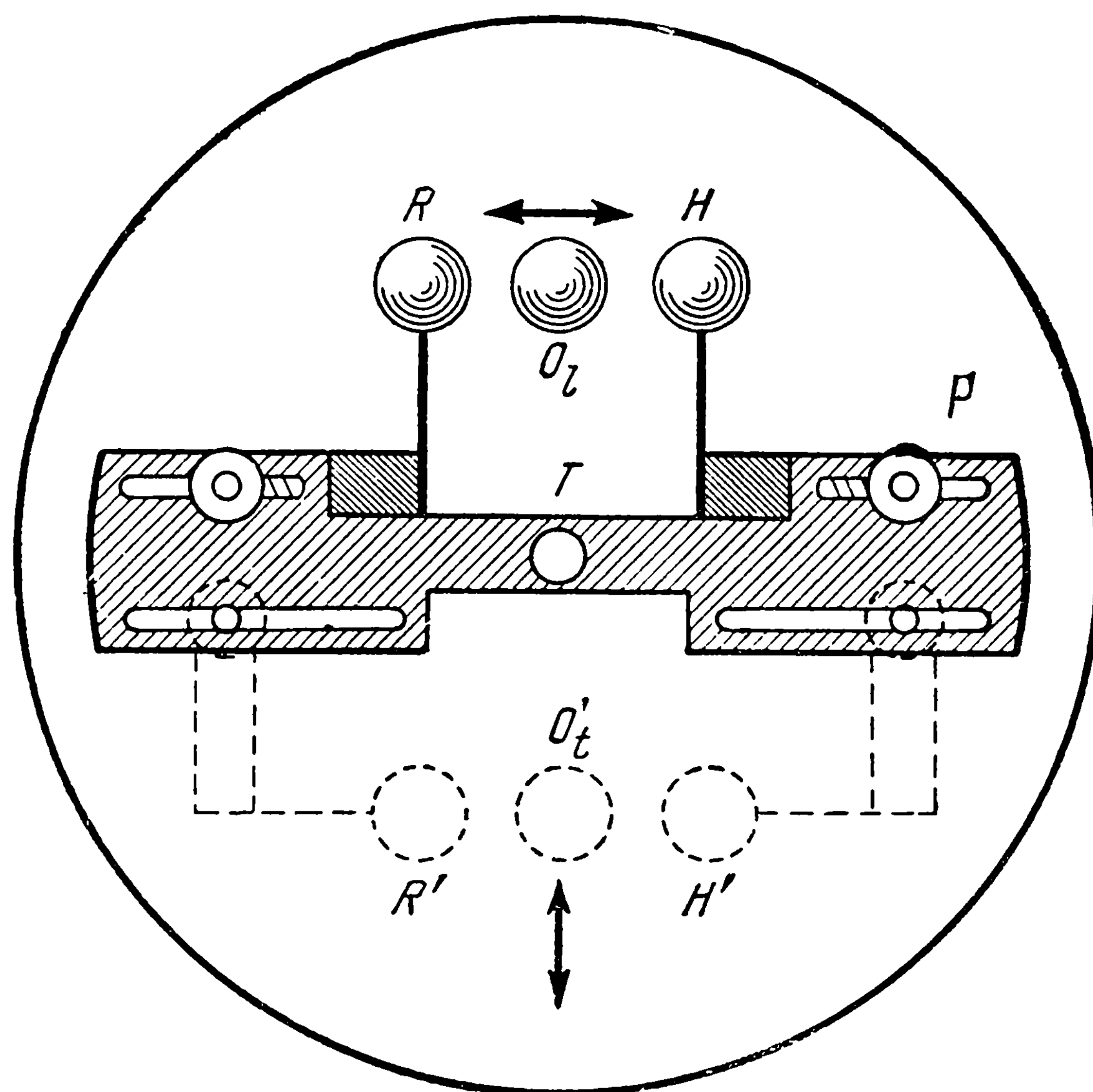


Рис. 15

5. *Крутильный прибор*, при помощи которого определялась разница действия осциллирующего шарика на резонатор и на компенсирующее его тело, был устроен так, чтобы допускать исследование как продольных, так и поперечных колебаний; он состоял (рис. 15) из медной пластинки P, которая с помощью вертикального стержня T подвешивалась к крутильной проволоке; пластинка эта весила 370 *г* и имела 278 *мм* длины, ее момент инерции был достаточно велик, чтобы давать прикрепленному к ней резонатору достаточно неподвижную точку опоры. Из рис. 15 (вид сверху) видно расположение осциллирующего шарика O_l и O_t' и соответствующее укрепление резонатора R и R', а также компенсирующего тела H и H' для исследования продольных колебаний в первом и поперечных колебаний во втором случае. Для того чтобы стержень T удержать в вертикальном положении и при односторонней нагрузке пластинки P, к верхней

части этого стержня T (выше уровня воды) была приделана горизонтальная стрелка (на рис. 15 она не показана), к которой прикреплялся соответствующий противовес; при вращении прибора стрелка могла двигаться только в очень узком интервале вблизи нулевого положения, удерживаемая с той и с другой стороны арретирами: такое приспособление необходимо, так как иначе при недосмотре действующие силы могли бы слишком сильно вывести весь прибор из первоначального положения и осциллирующий шарик мог бы бить по шарику резонатора или по шарику компенсирующего тела.

Описанное выше расположение позволяло пользоваться тем же самым резонатором как для исследования продольных, так и поперечных колебаний, причем плечи, на которые действуют крутящие силы, в обоих случаях равны.

Крутильная проволока была стальная ($d = 0{,}38$ *мм*, $l = 44$ *см*); время половины полного качания системы 8—10 *сек*.

Головка крутильного приспособления была разделена на целые градусы и снабжена нониусами.

6. *Водяная ванна* представляла собою металлический цилиндр в 40 *см* диаметра и 60 *см* высоты.

III. Опыты

Приступая к измерениям тех сил, которые возникают благодаря принужденному колебанию резонатора, необходимо предварительно убедиться, что как шарик резонатора, так и шарик компенсирующего тела установлены симметрично относительно осциллирующего шарика и что, следовательно, силы, не зависящие от движения резонатора, компенсированы; заставляя электродвигатель делать произвольное, достаточно большое число оборотов, при котором явления, обусловленные резонансом, всегда слабо выражены, обыкновенно наблюдаем небольшую крутящую силу, действующую в ту или другую сторону и обусловленную незначительной случайной асимметрией в расположении крутильного прибора по отношению к осциллирующему шарику; изменяя (поправляя) нулевое положение нашей системы, легко достигнуть того, что эта сила делалась практически незаметной и, следовательно, не могла оказывать влияние на дальнейшие измерения.

Отдельные наблюдения проводились следующим образом: после того как грузы электромагнитного камертона (см. II, 2) установлены так, чтобы скорость электродвигателя получила желаемую величину, двигатель пущен в ход и скорость его установилась, проводились наблюдения как числа его оборотов в минуту (при помощи хронометра), так и величины крутящих сил, действующих на проволоку крутильного прибора. Это последнее наблюдение проводилось таким образом, что проволока закручивалась на некоторый угол, стрелка крутильного прибора (см. II, 5) под-

водилась к «нулевому положению» между двумя арретирами и затем представлялась самой себе: если угол закручивания соответствовал действующим силам, то стрелка некоторое время удерживалась в равновесии (неустойчивом) около «нулевого положения» и затем под влиянием случайных неправильностей отклонялась в ту или другую сторону, тотчас же упираясь в арретир; при некотором навыке и при не слишком сильном движении резонатора легко было определить угол закручивания с точностью до нескольких долей градуса.

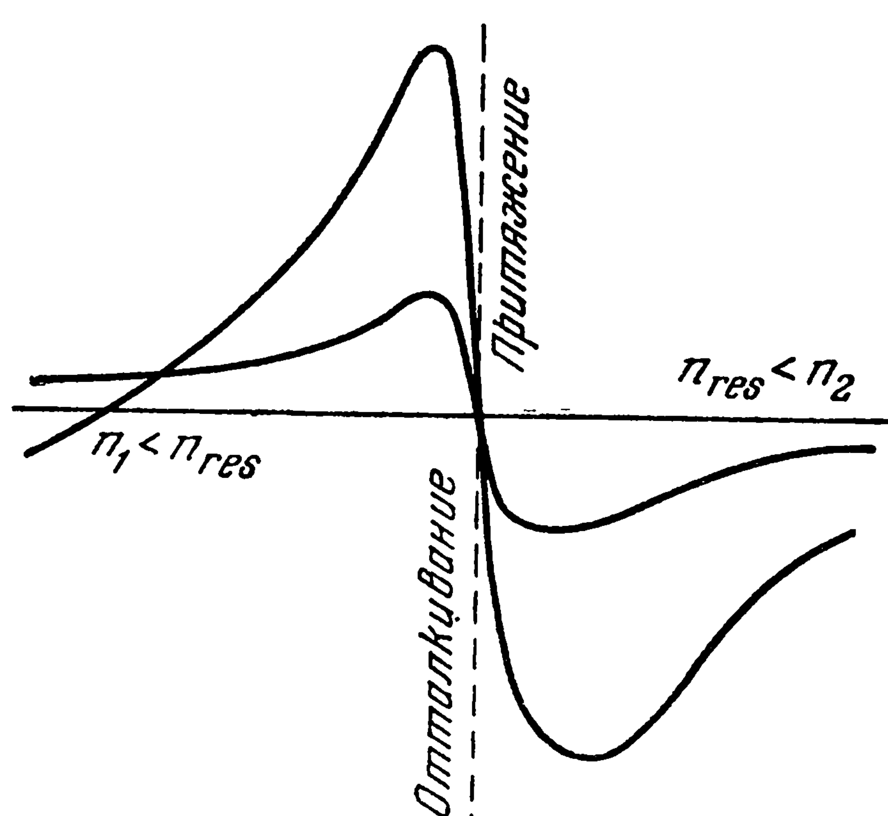


Рис. 16

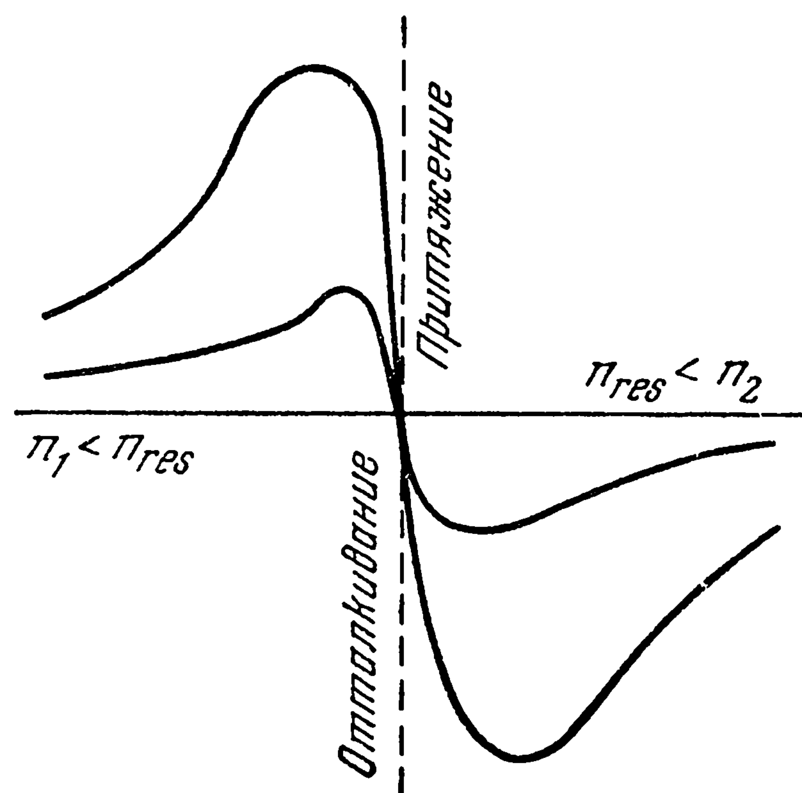


Рис. 17

Все наблюдения, которые я проводил при различных расположениях опыта, указывают, что зависимость пондеромоторного действия от резонанса во всех случаях одинакова; вот почему дальше я привожу только две серии наблюдений (для продольных и поперечных колебаний) с резонатором, сделанным из алюминия.

В помещенных ниже таблицах мною приведены наблюдения, которые были сделаны попеременно для амплитуд осциллирующего шарика $a_1 = 23$ и $a_2 = 11$ *мм* (см. II, 1). N обозначает номер наблюдения, n — число полных колебаний шарика в 1 *мин*, $\theta°$ — величину угла поворота головки крутильных весов; (+) обозначает притяжение резонатора осциллирующим шариком, а знак (—) — отталкивание.

Рис. 16 и 17 графически представляют результаты табл. 5 и 6; по оси абсцисс отнесены числа колебаний n осциллирующего шарика, а по оси ординат — величины пондеромоторных сил по измерениям на крутильных весах.

Таблица 5

Продольные колебания

(Расстояние центров шариков резонатора и компенсирующего тела $\Delta = 11$ *см*)

$a_1 = 23$ *мм*			$a_2 = 11$ *мм*		
N	n	θ_1°	N	n	θ_2°
22	807	— 1,0	21	808	+0,8
1	827	+ 2,8	18	836	+1,2
3	844	+ 9,3	20	845	+1,8
2	852	+16,5	19	858	+2,5
4	870	+29,0	13	867	+7,0
—	—	—	11	873	+5,8
10	880	—20,5	14	881	—8,7
8	881	См. прим.	—	—	—
7	894	—20,6	12	893	—6,9
—	—	—	17	901	—5,3
6	916	—10,5	15	915	—4,4
5	950	— 4,5	16	951	—2,2
23	1008	— 0,5	24	1008	—1,2

Примечание: Амплитуда резонатора чрезмерно велика; установки неопределенны.

Результаты приведенных выше наблюдений можно формулировать таким образом:

1) законы пондеромоторного действия осциллирующего шарика на соответствующий резонатор тождественны как для продольных, так и для поперечных колебаний;

2) когда резонатор выше настроен, то наблюдается притяжение; когда он настроен ниже, то отталкивание;

3) наибольшие величины этих противоположных пондеромоторных сил имеют место в непосредственной близости резонанса и непрерывно переходят друг в друга.

Сравнивая эти законы с законами, найденными для электромагнитных волн, мы убеждаемся, что эти законы представляют собою тождество: если бы мы в наших опытах с электромагнитными волнами расположили приборы так, чтобы наблюдать не вращение резонатора, а его притяжение или отталкивание вибратором, то, конечно, мы нашли бы те самые силы притяжения и отталкивания, которые нами наблюдались для гидродинамических колебаний.

Интересною особенностью найденного нами тождества, т. е. прямой аналогии между явлениями электрических и гидродинамических колеба-

Таблица 6

Поперечные колебания

(Расстояние центров шариков резонатора и компенсирующего тела $\Delta = 8$ *см*)

$a_1 = 23$ *мм*			$a_2 = 11$ *мм*		
N	n	θ°_1	N	n	θ°_2
19	814	+20,7	18	812	+ 3,9
1	829	+29,3	—	—	—
21	851	+80,0	17	857	+18,7
2	868	+77,5	10	865	+30,5
7	873	См. прим	15	873	+14,7
—	—	—	8	875	+ 4,8
6	880	—28,8	14	879	—16,8
—	—	—	11	884	—22,0
5	897	—56,3	9	893	—17,0
4	917	—33,3	12	913	— 9,0
3	953	—17,2	13	948	— 4,5
20	1007	— 7,3	22	1007	— 2,1

Примечание: Амплитуда резонатора чрезмерно велика; установки неопределенны.

ний, является то обстоятельство, что механические действия друг на друга двух независимых гидродинамических колебаний представляют собою, как то особенно подчеркнул C. A. Bjerknes [1], обратную аналогию с пондеромоторными взаимодействиями электрических и магнитных масс.

IV. Наблюдение движения резонатора

После того как законы действия осциллирующего шарика на резонатор были установлены, я попробовал свести наблюдаемые здесь явления к тем основным явлениям притяжения и отталкивания, которые были установлены C. A. Bjerknes'ом для двух независимо двигающихся шариков. Для этого являлось необходимым подробно проследить одновременно движение осциллирующего шарика и шарика резонатора, чтобы определить разницу фаз их колебаний.

Эти наблюдения пришлось делать стробоскопическим методом: электродвигатель, который сообщал движение шарику, одновременно вра-

[1] C. A. Bjerknes. Rep. für reine und angewandte Mathematik von L. Königsberger und G. Zeuner, 1. p. 264, Leipzig, 1877; Exner's Rep., 19, p. 288, 1883.

щал при помощи бесконечного шнура независимую ось с угловой скоростью на одну шестидесятую долю меньшей по сравнению с осью двигателя; на этой независимой оси был укреплен круг с прорезом, в который можно было наблюдать как осциллирующий шарик, так и шарик резонатора [1], причем кажущаяся скорость их движения была в шестьдесят раз медленнее действительной (приблизительно одно колебание в 4 *сек*); наблюдение разницы фаз, не зависящей от стробоскопического замедления колебаний, при таком медленном движении не представляет уже никаких затруднений.

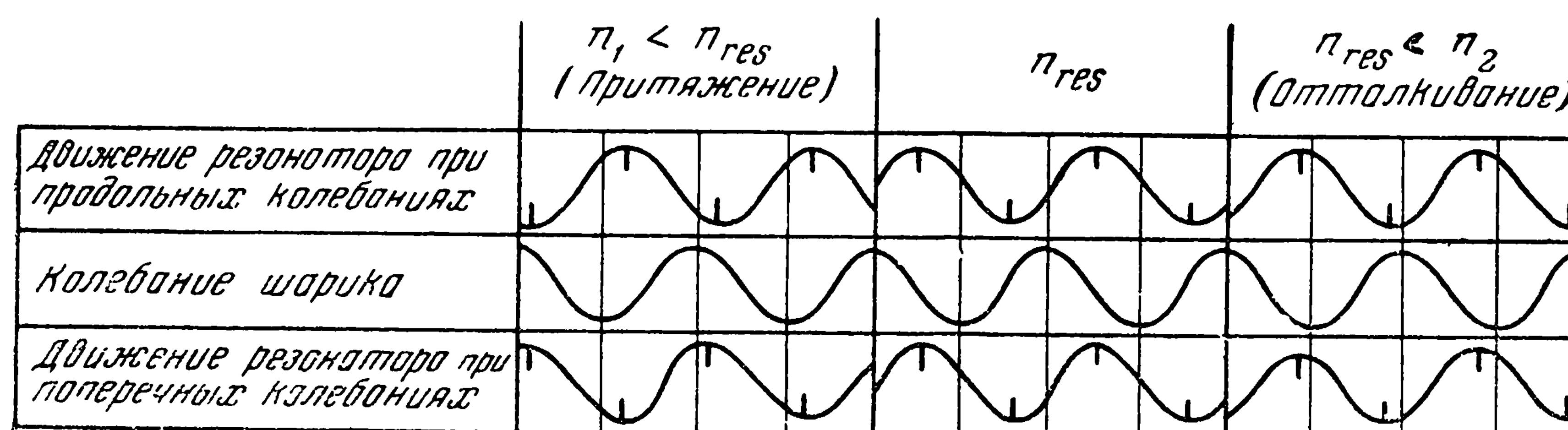


Рис. 18

Для последующих соображений было достаточно установить только знак разницы фаз, а не абсолютную ее величину (для точных измерений более соответствовал бы надлежащим образом измененный метод Лиссажу), поэтому можно было ограничиться наблюдениями при трех различных скоростях колеблющегося шарика: при полном резонансе и при отступлении от него приблизительно на 2% в ту и в другую сторону — причем моменты последовательного перехода через максимальное отклонение как осциллирующего шарика, так и шарика резонатора заносились графически. Рис. 18 представляет собой полученные результаты как для продольных так и для поперечных колебаний; абсциссы дают время, а ординаты— положение шариков.

При этих наблюдениях смещения фазы скорость мотора регулировалась вместо камертона таким же центробежным регулятором [2], как в фонографе Эдисона. Этот регулятор и давал короткое замыкание сопротивления r' (см. рис. 13); такое регулирование имеет преимущество в том, что оно допускает непрерывное изменение числа оборотов во время хода (передвижение контактной пружины), вследствие чего является возможность непрерывно проследить в непосредственной близости резонанса ход ампли-

[1] Крутильный прибор при этих опытах закрепляется неподвижно.

[2] Этот регулятор был связан с осью мотора посредством бесконечного шнура; при непосредственной связи регулировка была неудовлетворительна.

туд и фазы; при этом выступает с особенной ясностью, что смещение фазы очень скоро достигает предельных значений.

Результаты этих наблюдений можно формулировать таким образом.

Для продольных колебаний:

a) когда резонатор настроен выше, фаза почти обратная по сравнению с фазой движения осциллирующего шарика;

b) когда резонатор ниже настроен, то фаза почти одинаковая;

c) при переходе через резонанс разница фаз в четверть периода.

Для поперечных колебаний:

a) когда резонатор настроен выше, то фаза почти одинаковая с фазой движения осциллирующего шарика;

b) когда резонатор настроен ниже, то фазы почти противоположны;

c) при переходе через резонанс разница фаз в четверть периода.

Исследуя механическое взаимодействие двух независимо осциллирующих шариков, Bjerknes [1] нашел для колебаний продольных и для поперечных по отношению к линии их соединения разные законы.

Для продольных колебаний:

а) шарики притягиваются, когда движения их направлены в разные стороны;

в) они отталкиваются, когда движения их совпадают.

Для поперечных колебаний:

а) шарики притягиваются, когда движения их совпадают;

в) они отталкиваются, когда движения их противоположны.

Чтобы объяснить те пондеромоторные силы, которые мы наблюдали в случае резонатора, нам необходимо сделать допущение, что гидродинамические силы Bjerknes'а действуют на шарик резонатора совершенно так же, как они действовали бы на него, если бы движения, им совершаемые, были совершенно независимы от колебания осциллирующего шарика.

V. Теория пондеромоторного действия волн на гидродинамические резонаторы

Описанные выше явления можно рассматривать как частное проявление тех гидродинамических сил, тщательное изучение которых было уже начато в 1863 г. C. A. Bjerknes'ом; мы получим полную картину явления, если предположим, что шарик резонатора движется по закону упругих принужденных колебаний и приложим к этому случаю известные выражения, которые имеют место для пондеромоторного действия осциллирующего шарика на второй независимо осциллирующий шарик.

---

[1] C. A. Bjerknes. Exner's Rep., 19, p. 298—299, 1883.

Ниже мы сделаем вычисления для простейшего случая, когда расстояние шаров друг от друга велико по сравнению с их радиусами и амплитудами и жидкость неограничена, в бесконечности неподвижна, несжимаема, не обладает трением и не содержит вихрей; мы будем рассматривать здесь только те силы, которые обусловлены резонансом [1].

Мы рассмотрим сначала движение жидкости, вызываемое осциллирующим шаром, далее перейдем к рассмотрению, как действует эта жидкость на помещенный в ней шарик упругого маятника и какое движение последнего она вызывает, и, наконец, применим найденные C. A. Bjerknes'ом законы пондеромоторного взаимодействия двух шаров к случаю одновременного движения осциллирующего и резонирующего шарика.

Если шарик (радиуса R) двигается в данной жидкости с постоянной скоростью S_0' в направлении оси x, то потенциал скоростей Φ в окружающей жидкости имеет значение [2]

$$\Phi = S_0' \frac{R^3}{2} \frac{\partial\left(\frac{1}{r}\right)}{\partial x} = S_0' \frac{R^3}{2} \frac{\cos\theta}{r_2},$$

где r — радиус-вектор, и θ — полярный угол.

Слагающие v и w скорости движения жидкости во всякой плоскости меридиана могут быть представлены

$$v = \frac{\alpha\Phi}{rd\theta} = S_0' \frac{R^3}{2} \frac{1}{r^3} \sin\theta;$$

$$w = \frac{d\Phi}{dr} = S_0' R^3 \frac{1}{r^3} \cos\theta.$$

Течение жидкости изображено на рис. 19.

Приведенные выражения изображают течение жидкости для каждого данного момента времени; они приложимы также и в случае неравномерно движущегося (например, осциллирующего) шарика, так как все линии течения оканчиваются на поверхности шара и заданное здесь перемещение однозначно определяет движение жидкости.

Определим скорость движения жидкости для данного расстояния r от центра шара как в направлении поляры (т. е. для продольных смещений), так и в направлении, перпендикулярном к экваториальной плоскости (т. е. для поперечных смещений)

$$v_l = 0, \qquad u_l = S_0' \left(\frac{R}{r}\right)^3;$$

$$v_t = \frac{S_0'}{2} \left(\frac{R}{r}\right)^3, \qquad u_t = 0.$$

---

[1] В наших измерениях остальные силы исключены благодаря присутствию компенсирующего тела.

[2] G. Kirchhoff. Mechanik, p. 225, уравнение (27). Leipzig, 1883.

Как видно из рис. 19, обе скорости параллельны, но направлены в противоположные стороны.

Положим, что наш осциллирующий шарик совершает незатухающие синусоидальные колебания

$$(A) \qquad S_0' = \sigma_0' \sin at.$$

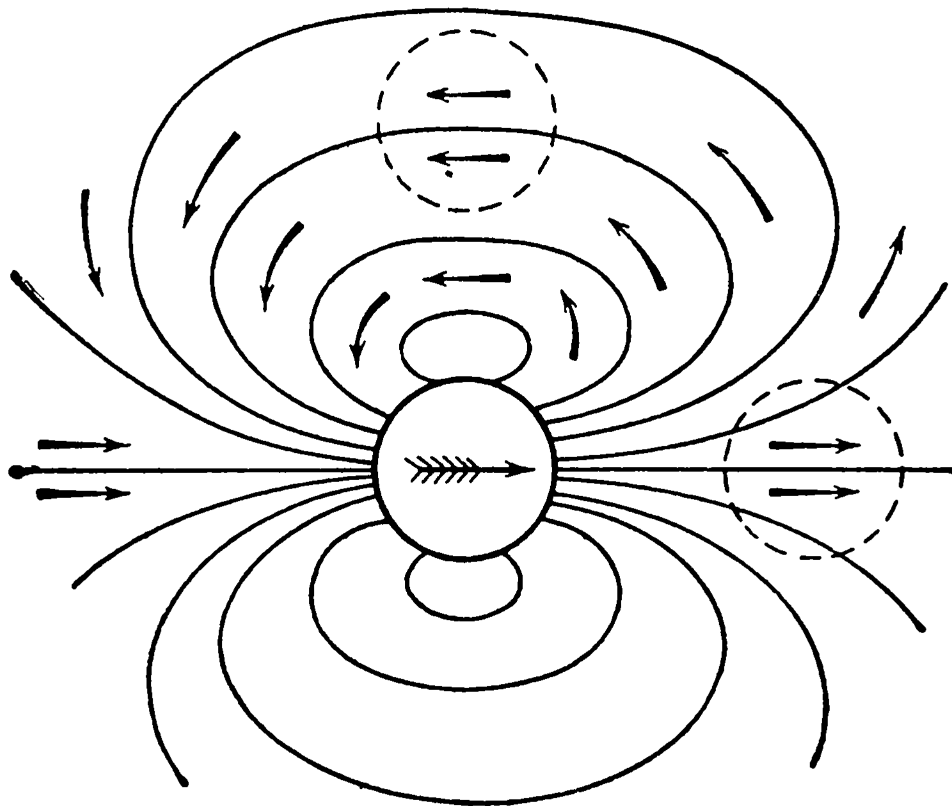


Рис. 19

Здесь σ_0' пропорционально максимальной скорости, a — числу колебаний; тогда движение жидкости для двух главных положений представится

$$(A') \qquad \begin{cases} G_l' = +G_0'\left(\frac{R}{r}\right)^3; \\ G_t' = -\frac{G_0'}{2}\left(\frac{R}{r}\right)^3. \end{cases}$$

Если осциллирующая жидкость имеет скорость $S' = G' \sin at$ и если в такой жидкости находится шарик упругого маятника, то этот шарик будет находиться под действием периодических сил $f(t)$, которые зависят только от ускорения жидкости и величина которых есть функция диаметра шара и плотности жидкости, в нашем случае — некоторая постоянная C_1,

$$f(t) = C_1 \frac{dS_0'}{dt} = A \cos at\,.$$

Под действием этой периодической силы шарик приходит в состояние колебательного движения, которое, как известно, можно представить как

сложное, состоящее из принужденного колебания и свободного собственного. Мы предположим, что собственные колебания слабо затухают [1] и через некоторое время исчезнут; тогда установится конечное стационарное состояние и надо принимать в расчет только принужденное колебание.

Скорость S'_r шарика резонатора может быть тогда представлена в виде

(C)
$$S'_r = C_2 S' \cos(at + a').$$

Величина C_2 — постоянная, зависящая как от диаметра шарика и его массы, так и от плотности жидкости.

Если отвлечься от постоянных факторов, входящие в (C) величины имеют значения [2]

(C′)
$$\begin{cases} S'_r = \dfrac{\sigma'_0 a^2}{\sqrt{(b^2+\beta^2-a^2)^2+4a^2\beta^2}}, \\ \text{и далее, принимая во внимание } (A), \\ S'_{rl} = +\dfrac{\sigma'_0 a^2}{\sqrt{(b^2+\beta^2-a^2)^2+4a^2\beta^2}}, \\ S'_{rt} = -\dfrac{\frac{1}{2}\sigma'_0 a^2}{\sqrt{(b^2+\beta^2-a^2)^2+4a^2\beta^2}}, \\ a' = \operatorname{arctg}\dfrac{b^2+\beta^2-a^2}{2a\beta}, \end{cases}$$

где b пропорционально числу колебаний собственного тона резонатора, а β пропорционально его затуханию.

Из (C') следует, что для $(b^2+\beta) = a^2$, т. е. при полном резонансе, амплитуда колебания достигает максимума, причем фазы движения отличаются друг от друга на $\frac{\pi}{2}$.

Если резонатор настроен выше возбуждающего колебания ($b > a$), то a' положительно и фазы движения стремятся стать противоположными для продольных и одинаковыми для поперечных колебаний; если резонатор настроен ниже, то происходит обратное явление.

Эти результаты вполне согласны с наблюдаемыми явлениями (см. отд. IV).

---

[1] Предположение полного отсутствия затухания приводит к несообразностям при полном резонансе (бесконечная амплитуда). Причина затухания, которое в наших опытах зависело от внутреннего трения жидкости, может быть обусловлено в жидкости без трения рядом побочных причин: несовершенной упругостью пружины, токами Фуко [20] в металлических шариках и т. п.

[2] См. например, мою работу Wied. Ann., 52, p. 635, 1894.

C. A. Bjerknes[1] вычислил притягательную силу, имеющую место в любой момент времени для случая пондеромоторного взаимодействия двух осциллирующих шариков, радиусы которых равны соответственно R_0 и R_r, и которые находятся друг от друга на расстоянии r_{or}. Если скорости шаров равны соответственно S_0' и S_r', то сила p может быть представлена[2]

$$p = \frac{\pi R_0^3 S_0' R_r^3 S_r'}{r_{or}^4} [\cos (S_0', S_r') + 3\cos (S_0', r_{or}) \cos (S_r', r_{or})] .$$

Для двух частных случаев параллельных колебаний, продольных и поперечных, это выражение, изображающее притягательную силу, принимает вид

$$(D) \qquad \begin{cases} K_l = -2 S_0' S_r' \dfrac{\pi R_0^3 R_r^3}{r_{or}^4}; \\ K_t = + \ S_0' S_r' \dfrac{\pi R_0^3 R_r^3}{r_{or}^4}. \end{cases}$$

Предположим, что эти выражения в силе также в том случае, когда S_r' — движение принужденное; тогда импульс притягательной силы Kdt, с которой осциллирующий шарик действует на шарик резонатора, может быть представлен на основании (A), (A'), (B), (C), (C') и (D), если мы отвлечемся от постоянных факторов

$$K_l dt = -2\sigma_0' \sin at \frac{\sigma_0' a^2}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}} \cos (at + a');$$

$$K_t dt = \frac{1}{2} \sigma_0' \sin at \frac{\sigma_0' a^2}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}} \cos (at + a').$$

Эти выражения показывают, что, за исключением фактора 4, пондеромоторные силы зависят от резонанса совершенно одинаково как для продольных, так и для поперечных колебаний, что и согласуется с приведенными (см. отд. III) наблюдениями.

Поэтому можно вести дальнейшее вычисление для этих двух случаев одновременно

$$(E) \qquad Kdt = -\frac{\sigma_0'^2 a^2}{\sqrt{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}} \sin at \cos (at + a').$$

---

[1] C. A. Bjerknes. Repertorium der reinen und angewandten Mathematik von L. Königsberger und C. Zeuner, 1, p. 624. Leipzig, 1877.
[2] l. c. p. 270, 266.

Для вычисления среднего значения притягательной силы K можно распространить интеграл на большой промежуток времени, кратный периоду колебания; тогда

$$K = -\frac{\sigma_0'^2 a^2}{\sqrt{(b^2+\beta^2-a^2)^2+4a^2\beta^2}} \frac{1}{T}\int\limits_0^T \sin at \cos(at+a')\,dt =$$

$$= +\frac{1}{2}\frac{\sigma_0'^2 a^2 \sin a'}{\sqrt{(b^2+\beta^2-a^2)^2+4a^2\beta^2}},$$

а подставляя значение постоянной a' из (C') и опуская $\frac{1}{2}$, получим

$$K = +\sigma_0'^2 \frac{a^2(b^2+\beta^2-a^2)}{(b^2+\beta^2-a^2)^2+4a^2\beta^2}.$$

Ясно, что притягательная сила прямо пропорциональна энергии E колеблющегося шара или окружающей его жидкости. Найденное выражение можно упростить для случая непосредственной близости резонанса и для малых значений β до тех пор, пока $(b^2+\beta^2-a^2)$ можно заменять через $2a(b-a)$, а также и для случая, когда мы отвлекаемся от области резонанса.

В этих случаях притягательные силы

$$K_R = E\frac{a(b-a)}{\beta^2+(b-a)^2}; \tag{I}$$

$$K_r = E\frac{2}{\left(\frac{b}{a}\right)^2-1}. \tag{II}$$

Рис. 20 иллюстрирует зависимость сил, действующих на резонатор в том случае, когда период резонатора остается неизменным, а период осциллирующего шарика изменяется при постоянной амплитуде (т. е. когда его максимальная скорость и вместе с этим энергия возрастает как a^2, что имело место в наших опытах). На рис. 20 ординаты пропорциональны силам, абсциссы — числам колебаний n осциллирующего шарика. Чертеж охватывает область $(b-a) = \pm 10\beta$; так как β, по предположению, мало, то и возрастание энергии E в этом интервале очень мало, и поэтому кривая симметрична по отношению к области полного резонанса.

Результаты можно выразить следующим образом:

1) пондеромоторное действие возбуждающего колебания на резонатор прямо пропорционально падающей энергии и зависит только от отношения чисел колебаний, а не от их абсолютных величин;

2) когда резонатор настроен выше, наблюдается притяжение; когда он настроен ниже — отталкивание; наибольшие величины этих противоположных пондеромоторных сил имеют место в непосредственной близости

резонанса и непрерывно переходят друг в друга. Это имеет место как для продольных, так и для поперечных колебаний;

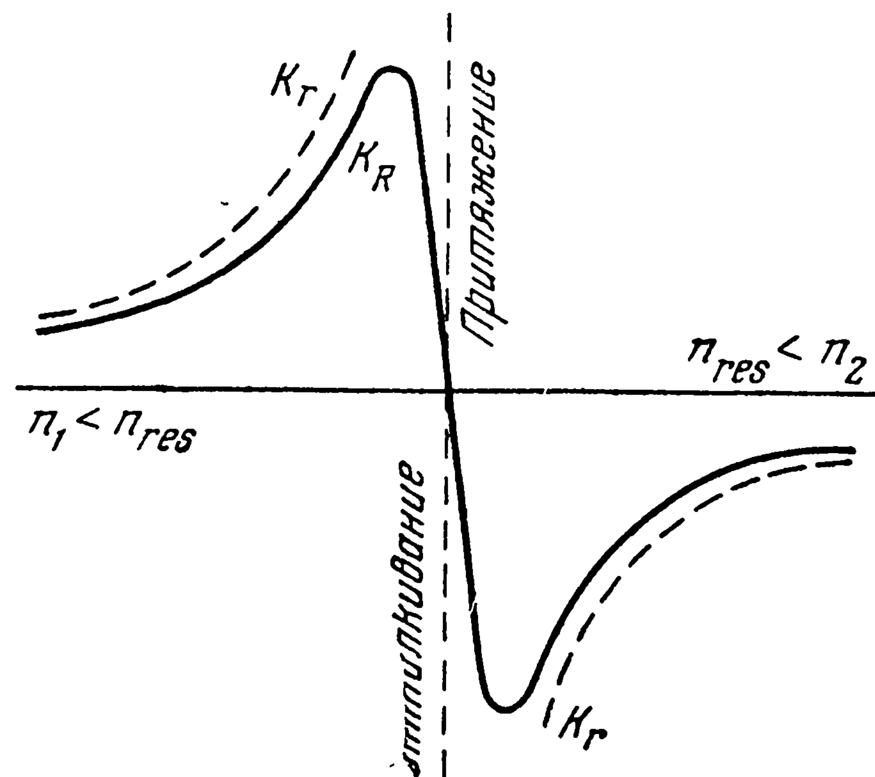


Рис. 20

3) наибольшие значения пондеромоторных сил при прочих равных условиях обратно пропорциональны β.

При выполнении точного вычисления действующих сил для случая, исследованного нами на опыте, мы встречаемся с чрезвычайными трудностями чисто аналитического характера. Приведенный расчет простейшего случая, при котором принимались во внимание только существенные черты явления, дает нам ход изменения пондеромоторных сил, который в общих чертах правильно передает наблюдаемые закономерности [1].

VI. Заключение

Если резюмировать все полученные результаты, то мы видим следующее.

1. Закон, по которому шарик, осциллирующий в жидкости, действует пондеромоторно на резонатор, может быть выведен из опытов и показывает одинаковый ход как при продольных, так и при поперечных колебаниях.

2. Наблюденные явления находят вполне естественное объяснение, если только сделать допущение, что и в случае принужденного движения сохраняют силу те же законы, которые были найдены C. A. Bjerknes'ом для шаров, колеблющихся независимо.

---

[1] Н. Е. Жуковский [21] (Труды Отд. физ. наук ОЛЕ, 8, вып. 2, стр. 25, 1896), указывая на мои исследования (Wied. Ann., 59, p. 131, 1896), дал гораздо более простой и общий вывод найденных мною законов, чем тот, который был предложен мною.

Здесь особо нужно указать на то, что эти законы, найденные для гидродинамических резонаторов, тождественны с теми законами, которые я ранее нашел для резонаторов электромагнитных, в то время как C. A. Bjerknes[1] доказал для независимых гидродинамических движений существование обратной аналогии с электрическими и магнитными действиями на расстояние.

Глава III

АКУСТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАТОРЫ

Закончив исследование электромагнитных и гидродинамических колебаний, я обратился к изучению пондеромоторных действий звуковых колебаний на соответствующие им резонаторы. Подобные исследования были сделаны раньше Dvořak'ом [22], который получил в этом направлении ряд интересных и ценных результатов; но наблюдения, им сделанные, лишь устанавливают самый факт пондеромоторного действия волн на резонаторы, не давая возможности вывести какие-либо резко выраженные законы его, так как во всех этих наблюдениях одновременно действовал ряд отличных друг от друга по своему происхождению пондеромоторных сил, управляемых разными законами; только расчленяя эти силы, изучая каждую из них в отдельности, мне удалось найти простые законы, ими управляющие.

Оставляя в стороне те весьма сложные случаи, когда резонатор находится в непосредственном соседстве с источником колебаний и составляет с ним одну сопряженную систему, мы можем те пондеромоторные силы, которые одновременно действуют на свободный резонатор, подразделить на три друг от друга независимые категории.

a. Непосредственное действие падающей волны на тело резонатора, как на всякое другое встречаемое волною препятствие. Величина этого действия зависит только от внешней формы резонатора и не зависит от периода его собственного колебания. Подобное действие звуковых волн было еще раньше найденно Guyot [23] и Schellbach'ом [2] и обстоятельно изучено другими исследователями. Эти действия мы можем свести к механическим силам известной гидродинамической задачи; при очень сильных колебаниях воздуха к этим пондеромоторным действиям присоединяются механические действия образующихся в этом случае вихрей, воздушных потоков и т. д.

в. Реакционные силы, испытываемые всяким звучащим телом в направлении, обратном направлению излучаемой волны; в случае резона-

[1] C. A. Bjerknes. Rep. für Math., l. c. p. 271; Exner's Rep., 19, p. 288, 1883.
[2] Bertin [24]. Ann. de Chim. et de Phys., (4) 25, p. 199, 1872.

тора эти силы не зависят от направления возбуждающей волны и достигают наибольших величин при полном резонансе, так как в этом случае собственное колебание резонатора будет наибольшее. Эти реакционные силы для случая открытых с одной стороны полых резонаторов были впервые обнаружены Dvořak'ом[1] и применены им для построения акустического «реакционного колеса» в резонаторах, излучающих энергию симметрично в разных направлениях (как, например, в струнах, пластинках, перепонках и т. д.), эти реакционные силы могут взаимно уравновешиваться.

c. Взаимодействие возбуждающего и возбужденного в резонаторе колебаний также сопровождается пондеромоторными силами, к которым примешиваются указанные выше силы непосредственного действия и реакционных эффектов и в большинстве случаев до неузнаваемости изменяют картину взаимодействия этих сил; из многочисленных наблюдений Dvořak'а это взаимодействие яснее всего выразилось в опытах с перепонками[2], так как в этом случае реакционные силы, по условиям симметрии, уравновешивались, и то притяжение выше настроенных перепонок и отталкивание настроенных ниже, которое наблюдал Dvořak, мы должны приписать силам взаимодействия колебаний.

Цель моей работы — исследовать пондеромоторные силы, обусловленные взаимодействием возбуждающего и возбужденного колебания, для случая открытых с одной стороны полых резонаторов (независимо от непосредственного действия волн и от реакционных сил колебаний) и выяснить зависимость исследуемых сил от резонанса.

I. Расположение опытов

Следуя примеру Dvořak'а, я пользовался продольным колебанием стержней Кундта как источником звуковых волн; цилиндрическими резонаторами служили тонкостенные стеклянные трубки, высоту собственного тона которых легко было изменять в широких пределах, передвигая пробковые донышки их; пондеромоторные силы, действующие на резонатор, измерялись углом кручения проволоки, к которой был подвешен исследуемый резонатор.

При выборе приема наблюдений особое внимание было обращено прежде всего на реакционные силы, которые при полном резонансе делаются особенно велики; чтобы избавиться от них, цилиндрический резонатор подвешивали к крутильной нити таким образом, что (вертикальная) ось вращения пересекала (горизонтальную) ось резонатора; реакционные силы в этом случае не могут производить вращения системы и, следовательно, не входят в результаты наблюдений.

---

[1] V. Dvořak. Ber. d. Wien. Akad., **72** (II Abth.), p. 213, 1875; Pogg. Ann., **175**, p. 42, 1876; Wied. Ann., **3**, p. 328, 1878.

[2] V. Dvořak. Ber. d. Wien. Akad., 84 (II Abth), p. 710, 1882.

Что касается непосредственного действия звуковых волн на тело резонатора, то их легко обнаружить, запирая отверстие резонатора пробковым донышком: раз определив величину этой силы, нетрудно было принимать ее во внимание при обработке результатов наблюдений. Наконец, чтобы уменьшить эту постоянную силу, в ряде опытов был применен такой прием: к стержню, к которому подвешивался резонатор, была прикреплена металлическая пластинка под углом в 45° к направлению распространения звуковой волны; размеры этой пластинки подстриганием изменялись до тех пор, покуда при закрытом отверстии резонатора и возможно сильном возбуждении кундтовского стержня вся система заметно не вращалась.

Чтобы сравнивать отдельные наблюдения между собою, сила звука, даваемого кундтовским стержнем, определялась при помощи диска Rayleigh'a или реакционными силами неизменного резонатора.

Передвигая пробковое донышко резонатора (тем изменяя его длину, а следовательно и период его собственного колебания), я наблюдал для каждого положения донышка одновременно сравнительную силу звука (как указано выше и величину действующих на резонатор сил углом кручения проволоки подвеса; приводя указанные наблюдения к некоторой постоянной силе звука, мы получаем зависимость пондеромоторных сил от длины резонатора и, делая поправку на открытый конец его, от длины волны его.

Наблюдения проводились как в непосредственном соседстве источника звука, так и в значительном от него расстоянии; как источники, так и способ наблюдения их возбуждения были различны в этих двух случаях.

II. Приборы

1а. *Кундтовский стержень*, при помощи которого были исследованы действия источника на резонатор, находящийся в его непосредственном соседстве, был расположен вот каким образом (рис. 21): стеклянная трубка S диаметром в 1 *см* и длиною в 150 *см* была на концах заткнута

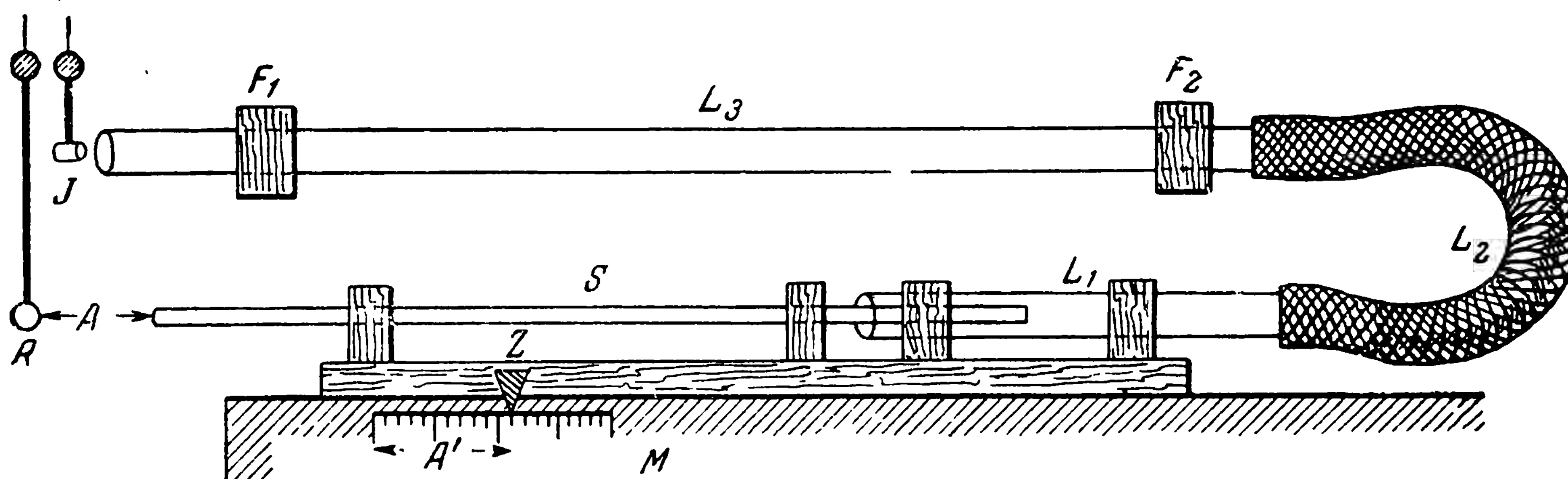


Рис. 21

пробками и залита сургучем, так что концы ее представляли собою звучащие кружки в 1 *см* диаметром; с помощью двух зажимов трубка была прикреплена к деревянной доске и давала при возбуждении $\lambda = 94$ *мм* (в воздухе). Один конец трубки посылал волны по направлению к резонатору R, а другой действовал на индикатор (реакционный резонатор) J; последнее достигалось тем, что звук передавался с помощью стеклянной трубки L_1 и гибкой резиновой трубки L_2, стеклянной трубке L_3, неподвижно укрепленной в зажимах F_1 и F_2. Передвигая доску с кундтовским стержнем, можно было по желанию изменить расстояние A между источником звука и резонатором (и отсчитывать это расстояние по масштабу M), не изменяя при этом условий действия другого конца стержня на индикатор J[1].

1в. *Кундтовская трубка* (рис. 22), которая служила для возбуждения интенсивных звуковых волн, состояла из стеклянной трубки S в 155 *см*

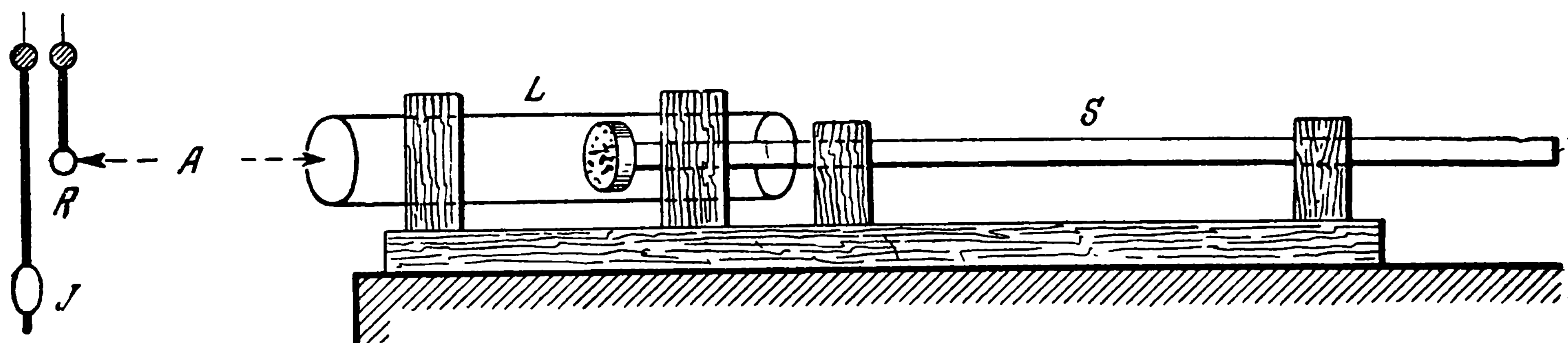


Рис. 22

длины и 2,2 *см* диаметра, снабженной пробковым диском и открытой стеклянной резонаторной трубкой L; при возбуждении трубка давала $\lambda = 100$ *мм* (в воздухе). Труба L (внутренний диаметр 4,4 *см*) всегда устанавливалась так, что пробковая пластинка находилась на расстоянии 2,7 или 12 *см* от открытого конца трубы.

2. *Резонаторы* были устроены по Dvořak'у из тонкостеклянных трубок (длиною в 45 *мм*) и имели внутренние диаметры у резонатора I — $d_1 = 8$ *мм*, у резонатора II — $d_2 = 11$ *мм*. Края резонаторов были отшлифованы. Передвигая пробковое донышко S, можно было по желанию изменять длину воздушной колонны l и легко измерять ее с помощью масштаба; задний конец резонатора был закрыт пробкою K. Каждый резонатор имел две петли O_1 и O_2, которые служили для подвешивания его к крутильному прибору, как то указано на рис. 23 и 24. Массивная клемма T препятствовала «сдуванию» резонатора реакционными силами.

---

[1] Пользуясь такими длинными трубками, надо иметь в виду, что настройка и, следовательно, действие стержня на резонатор могут в сильной степени зависеть от колебаний температуры. Шерстяная тряпка, как обыкновенно, смачивалась чистой водой; для особенно сильного возбуждения следует брать воду с большой примесью алкоголя или чистый алкоголь.

3а. *Индикатором* в опытах с кундтовским стержнем (см. рис. 21) служил неизменяемый резонатор, настроенный на максимальное возбуждение, прикрепленный к коромыслу крутильного приспособления, как в опытах Dvořak'а[1], так, чтобы реакционные силы могли вращать его; отверстием он был обращен к трубке L_3 (см. рис. 21), и величиною крутящих сил измерялась степень возбуждения кундтовского стержня.

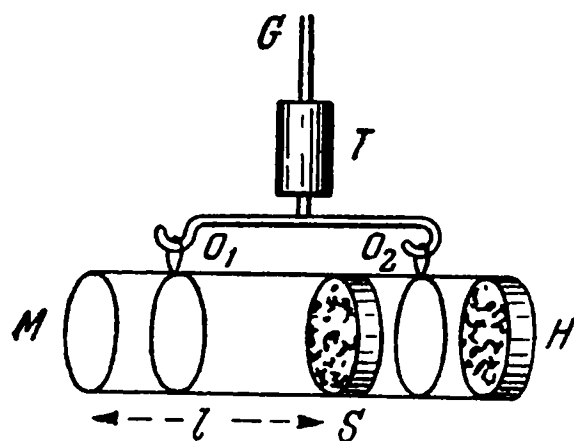


Рис. 23

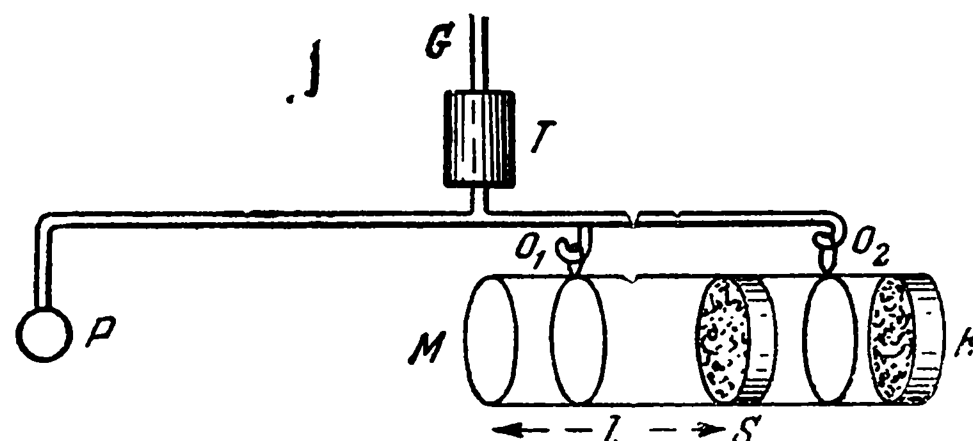


Рис. 24

3в. *Диск Rayleigh*'а, который служил индикатором при опытах с кундтовской трубкой (см. рис. 23), представлял собою цинковый кружок (рис. 25) в 0,2 *мм* толщиною с 50 *мм* диаметром; он был так прикреплен (на стеклянном стержне G) к крутильному приспособлению, что его плоскость составляла угол в 45° с плоскостью падающей на него волны.[2]

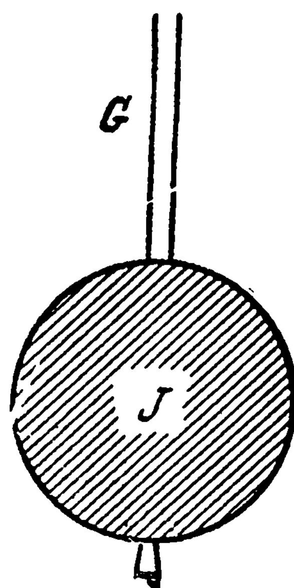


Рис. 25

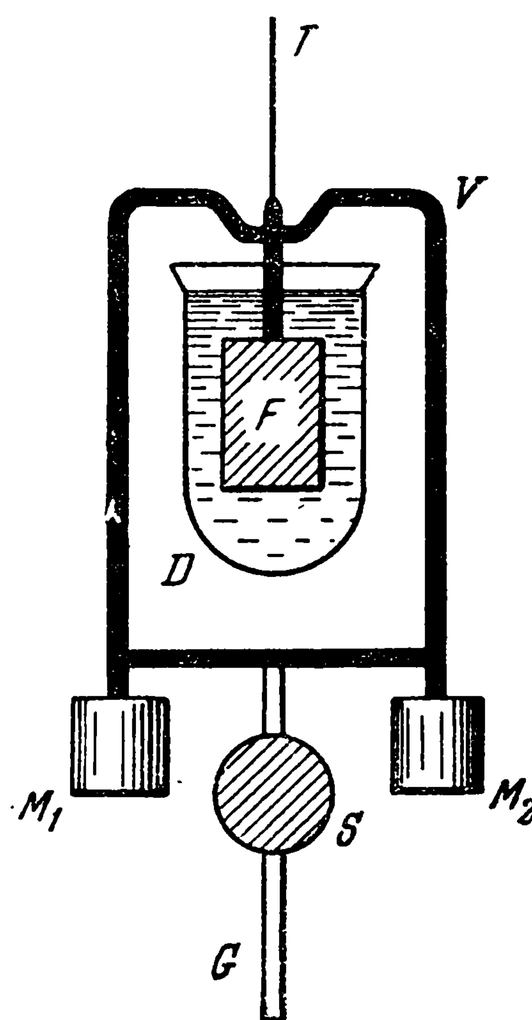


Рис. 26

4. *Крутильный прибор* (рис. 26) был одинаково устроен как для индикаторов, так и для резонаторов: стеклянный стержень G был подвешен

[1] C. V. Dvořak. Wied. Ann., 3, p. 333, 1878.

[2] Относительно применения диска Рэлея к измерению интенсивности звука см. E. Grimsehl [25]. Wied. Ann., 34, p. 1028, 1888.

к тонкой металлической проволоке (платиновой, $d_1 = 0{,}05$ *мм*, $L_1 = 2{,}5$ *см* или серебряной, $d_2 = 0{,}1$ *мм*, $L_2 = 45$ *см*), причем каждый прибор имел свой успокоитель: пластинка F была погружена в сосуд D, наполненный маслом; чтобы период колебания всей системы был не особенно мал, к рамке успокоителя были прикреплены металлические массы M_1 и M_2, благодаря которым колебания ($l/2 = 7$ и 9 *сек*) совершались достаточно медленно для удобного отсчета точек поворота.

5. *Зеркальный отсчет* был устроен по способу, употребленному при исследовании электромагнитных колебаний (см. гл. I, I, § 8, и позволял делать отсчеты отклонения индикатора и резонатора одновременно; приборы были расположены так, что наблюдатель мог одновременно возбуждать кундтовский стержень и делать отсчеты в трубу.

Как резонатор, так и индикатор были защищены от случайных воздушных течений проволочной цилиндрической клеткой (высота 40, диаметр 30 *см*), покрытой тонким слоем ваты: звуковые волны свободно могли проходить через эти мягкие стенки без каких-либо изменений или отражений. Кундтовский стержень (см. рис. 21) входил внутрь этой клетки, тогда как кундтовская трубка (см. рис. 22) при опытах находилась вне ее.

III. Опыты

Наблюдения проводились таким образом, что стержень возбуждался по возможности с одинаковой силой и всегда одинаковым способом в течение всей серии отсчетов; отклонения резонатора и индикатора отсчитывались пять раз подряд; каждое отдельное наблюдение приводилось вычислением к некоторому определенному отклонению индикатора, что не представляет затруднения, так как отношение отклонения индикатора и резонатора в широких пределах остается постоянным; затем из этих пяти приведенных отдельных наблюдений выводилась средняя величина.

Чтобы исследовать пондеромоторные действия в непосредственном соседстве источника звука, источником последнего служил кундтовский стержень (см. рис. 21), а резонатор был укреплен, как показано на рис. 23, и притом так ориентирован, что продолжение оси стержня было перпендикулярно оси резонатора и проходило через открытый конец его. В табл. 7 даны отклонения резонатора (в делениях шкалы), приведенные к постоянной силе возбуждения кундтовского стержня, полученные из непрерывного ряда наблюдений, в которых была изменяема как длина воздушной колонны в резонаторе, так и расстояние A между концами кундтовского стержня и серединой отверстия резонатора; знак (+) обозначает притяжение источником, а (—) — отталкивание.

Для расстояний $A_1 = 1$ *см* и $A_2 = 2$ *см* приведены, помимо непосредственно наблюденных величин («набл.»), еще и поправленные («попр.») величины: при описанных опытах непосредственное действие волны на открытый конец резонатора не было исключено и давало постоянное

Таблица 7

l, *мм*	$A_1 = 1$ *см*		$A_2 = 2$ *см*		$A_3 = 3$ *см*	$A_4 = 4$ *см*	$A_5 = 5$ *см*	$A_6 = 6$ *см*
	набл.	попр.	набл.	попр.				
5	+85	0	+2,2	0	—0,1	0	0	0
17	+210	+125	+7,5	+5,3	+1,5	+0,4	+0,6	0,0
19	+323	+238	+10,7	+8,5	+1,8	+0,5	+0,5	0,1
20	+371	+286	+10,5	+8,3	+2,1	+0,5	+0,3	—0,3
21	+819	+734	—4,5	—6,5	—8,4	—7,1	—5,0	—1,3
22	—400	—485	—65,0	—67,2	—22,0	—11,0	—3,1	—1,5
23	—232	—317	—27,0	—29,2	—7,6	—3,4	—0,9	—0,3
24	—59	—144	—9,7	—11,9	—3,5	—1,5	—0,5	—0,3
25	+24	—62	—7,7	—9,9	—3,7	—1,7	—0,7	—0,3

отклонение для всех длин воздушной колонны, если она была меньше 10 *мм*, ввиду этого мы должны считать, что и для больших длин l отсчеты изменены на величину указанного постоянного притягательного действия источника, и мы получаем величины интересующих нас взаимодействий (с достаточной для нас степенью точности), вычитая указанную величину из наблюденных отсчетов. Для больших расстояний A это непосредственное действие не оказывает заметного влияния, так как оно уравновешивается, равномернее распределяясь на оба конца резонатора.

Чтобы определить длину волны, соответствующую данной длине воздушной колонны в резонаторе, надо было еще определить величину поправки на открытый конец его. Эту последнюю нетрудно найти, если взять открытую стеклянную трубку, имеющую одинаковые диаметр с трубкой резонатора, образовать в ней при помощи того же стержня кундтовы пыльные фигуры и измерить расстояние последнего узла от открытого конца трубки. Для употребленной длины волны $\lambda = 94$ *мм* это последнее расстояние оказалось $l_r = 21{,}5$ *мм*, а, следовательно, поправка на открытый конец $\delta = 2$ *мм*.

Характер действующих на резонатор пондеромоторных сил в непосредственной близости от источника ($A_1 = 1$ *см*) графически представлен на рис. 27; здесь по абсциссам отложены длины волн резонатора, а по ординатам — действующие на него пондеромоторные силы; v обозначает длину волны источника.

Описанные особенности мы можем выразить таким образом:

1) резонатор, настроенный выше источника, притягивается им: он отталкивается этим последним, если настроен ниже источника;

2) максимумы этих противоположных действий имеют место вблизи резонанса.

Тождественные законы нашел раньше Dvořak [1] для случая настроенных перепонок.

Надо заметить, что указанные законы имеют место только в непосредственной близости от источника и только в том случае, когда размеры источника — в наших опытах кружок в 10 *мм* диаметра (конец стержня)— малы сравнительно с длиной волны, а поверхность самой волны имеет значительную кривизну; экспериментируя с большими колеблющимися поверхностями, мы не находим указанных простых законов.

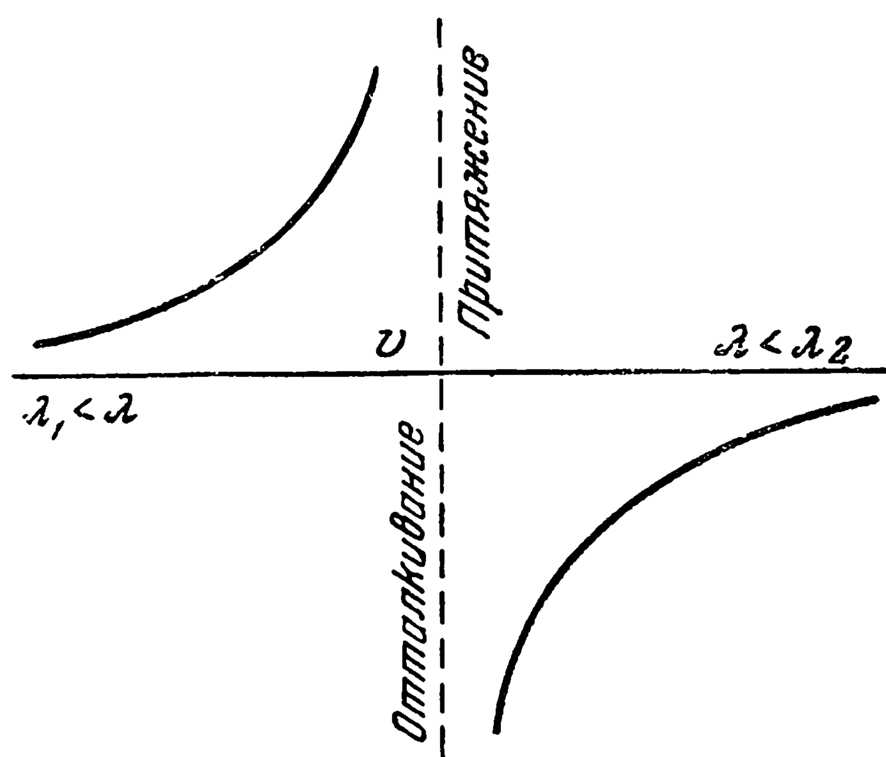


Рис. 27.

Постепенно увеличивая расстояние между резонатором и источником колебания, мы замечаем (см. табл. 7), что силы притяжения постепенно исчезают, тогда как максимум отталкивательных сил перемещается, приближаясь к точке полного резонанса; при достаточно больших расстояниях ($A_6 = 10$ *см*) сил притяжения нет, остаются одни лишь отталкивательные силы, наибольшая величина которых совпадает с полным резонансом.

Чтобы исследовать пондеромоторное действие волны, свободно распространяющейся в пространстве, необходим весьма сильный источник звука, и таковым с успехом может служить кундтовская трубка (см. рис. 22). Ряд наблюдений, предпринятых при различных условиях, заставил прийти к заключению, что в этом случае мы имеем дело с двумя независимыми друг от друга силами: с одной стороны, это суть вращающие силы, стремящиеся ориентировать отверстие резонатора известным образом по отношению плоскости волны,— силы, знак которых меняется при переходе через резонанс; а с другой стороны, мы имеем силы давления волны на отверстие резонатора,— силы, стремящиеся двигать отверстие резонатора в направлении движения волны и достигающие своего максимума при полном резонансе, следовательно, не меняющие своего знака. Я не буду приводить здесь первоначальных опытов и ограничусь лишь описанием тех приемов, которые позволяют изучать эти силы независимо друг от друга.

Чтобы исследовать вращающие силы, действующие на отверстие резонатора, самый резонатор был подвешен так, как указано на рис. 24: середина отверстия совпадает с осью вращения, почему все силы давления, действующие на это отверстие, не могут произвести вращения системы и потому исключены из наблюдений. Располагая отверстие резонатора на расстоянии $A_0 = 21$ *см* от отверстия кундтовской трубки, притом так, чтобы ось резонатора составляла угол в 45° с направлением звука, и

[1] V. Dvořak. Ber. d. Wien. Akad., 84, (II Abt), p. 710, 1882. Эти результаты можно, опираясь на опыты Стро (Stroh [26], Nature, 26, p. 134, 1882), свести прямо на изученную мной гидродинамическую задачу (см. выше стр. 101—108).

уменьшая эффект непосредственного действия звуковых колебаний на тело резонатора металлической пластинкой (в 2 × 3 *см*), укрепленною на стержне крутильного приспособления в плоскости, перпендикулярной оси резонатора (как о том сказано выше, I), нетрудно исследовать вращающие силы.

В табл. 8 приведены результаты наблюдений в делениях шкалы, отнесенные к некоторому определенному возбуждению кундтовской трубки: знаком (+) обозначено такое вращение, которое стремится поставить отверстие резонатора в плоскость волны, т. е. так, чтобы возбуждение его при вращении увеличивалось, тогда как знак (—) обозначает вращение в противоположную сторону. Длина резонатора, соответствующая максимальному резонансу и определенная, как было указано выше, $l_r = 21{,}5$ *мм*.

В табл. 8 рядом с наблюденными («набл.») средними величинами приведены также средние колебания отдельных отсчетов, для того чтобы дать возможность судить о точности подобного рода измерений. Для длины воздушной колонны резонатора $l = 5$ *мм* наблюдается отклонение, величина которого для всей длины менее 10 *мм* не зависит от степени резонанса и, очевидно, обусловлена не полной компенсацией непосредственного действия волны на тело резонатора. Чтобы получить величину вращающих сил независимо от этой случайной постоянной силы, надо

Таблица 8

l, *мм*	Набл.	Попр.	l, *мм*	Набл.	Попр.
5	—1,6±0,6	0	22	—11,6±0,4	—10,0
17	—1,2+0,8	+0,4	23	—12,8±1,2	—11,4
19	—1,0±0,2	+0,6	24	—6,5±1,4	—6,1
20	+7,0±1,4	+8,6	27	—2,0±1,0	—0,4
21	+11,4±1,0	+13,0			

вычесть эту величину из данных наблюдений, и тогда мы получаем ряд поправленных («попр.») величин в таблице.

Зависимость вращающих сил от резонанса графически изображена на рис. 28, где по абсциссам отложены длины волн резонатора (v означает длину волны источника), а по ординатам отложены величины соответствующих вращающих сил.

Результаты наблюдений можно выразить таким образом:

1) плоская волна вращает резонатор таким образом, чтобы отверстие его совпало с плоскостью волны и, следовательно, возбуждение его увеличилось, если резонатор настроен выше, и вращает его в обратную сторону, если он настроен ниже;

2) максимумы этих противоположных действий лежат вблизи резонанса.

Силы давления плоской волны, силы, стремящиеся увести отверстие резонатора в направлении распространения звука, можно исследовать на том же резонаторе (см. рис. 24), но с той разницей, что поместить отверстие его на другом конце трубки (т. е. на расстояние 45 *см* от оси вращения). Если установить резонатор так же, как в первом случае, (пользуясь и теперь пластинкой, компенсирующей непосредственное действие волны на тело резонатора), то наблюдения показывают, что при этих условиях отверстие резонатора всегда отталкивается источником колебаний и стремится двигаться в направлении распространения звука. В табл. 9 приведены результаты наблюдений (в делениях шкалы).

Таблица 9

l, *мм*	Набл.	Вращен.	Попр.	l, *мм*	Набл.	Вращен.	Попр.
2	0	0	0	21	—155	+1,3	—156
17	—14	0	—14	22	—101	—1,0	—100
19	—13	+0,1	—13	24	—3	—0,6	—2
20	—53	+0,9	—54	26	—1	—0	—1

В табл. 9 приведены, кроме результатов наблюдения («набл.»), еще и вычисленные силы вращения («вращен.»), налагающиеся на исследуемые силы отталкивания: в настоящем случае эти силы были почти в 10 раз меньше, чем при описанных выше опытах (см. табл. 8), потому что в этом случае при измерениях оказалось достаточным возбуждать кундтовскую трубку почти в 10 раз слабее (чему соответствовало и в 10 раз меньшее отклонение индикатора); в столбце «попр.» приведены силы отталкивания, получаемые из наблюдений, если поправить эти последние на примешанные к ним небольшие силы вращения. Рис. 29 представляет зависимость этих отталкивательных сил от резонанса.

Чтобы убедиться, что наблюденные отталкивательные силы не появились благодаря случайному и незамеченному отступлению от симметрии в расположении резонатора и не вызваны реакционными силами его, тот же ряд наблюдения был повторен, причем для каждой длины воздушной колонны резонатора кундтовская трубка то находилась в прежнем положении, то перемещалась на том же расстоянии от оси вращения, но была перенесена на 90° вокруг этой последней, т. е. находилась на 45° по другую сторону от оси резонатора. Как резонатор, так и индикатор давали в этом последнем случае отклонения на шкале в противоположном направлении. Если бы существовало заметное действие реакционных сил самого резонатора, то эти силы всегда действовали бы в одном направле-

нии, и, увеличивая отклонения для одного положения трубки, они уменьшали бы их для другого; оба ряда наблюдений не сходились бы. Сколько-нибудь заметной разницы в двух таких сериях наблюдений, однако, не удалось обнаружить, и потому мы вправе утверждать, что указанное явление обусловливается действием падающей волны на отверстие резонатора.

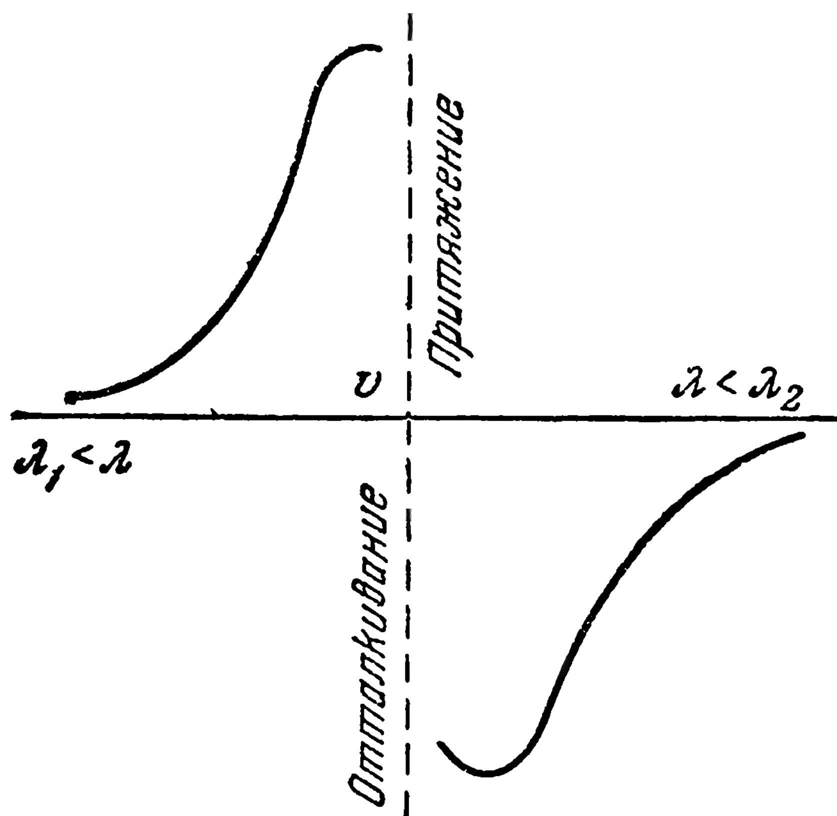


Рис. 28

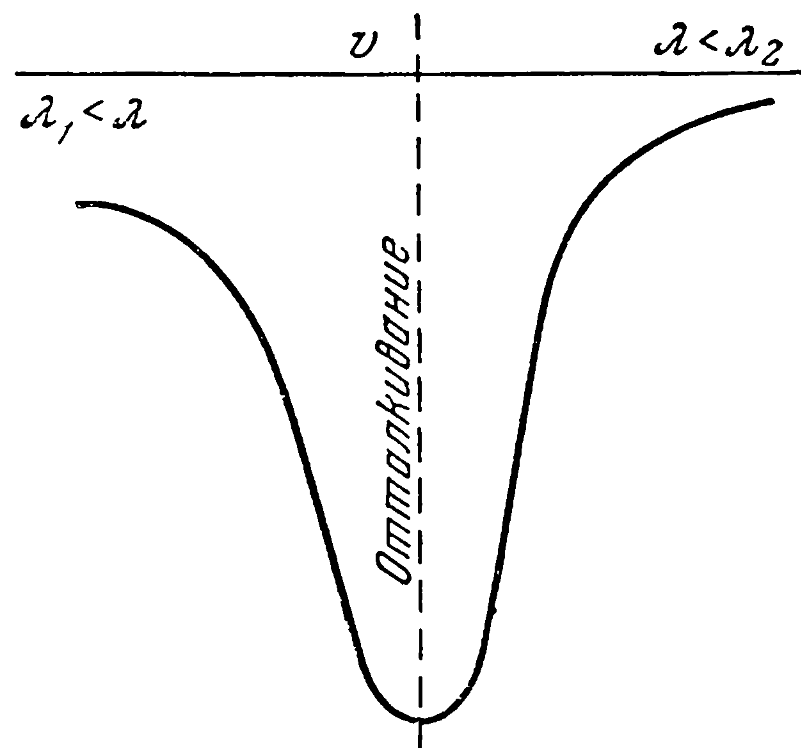


Рис. 29

Указанную отталкивательную силу удается наблюдать и в том случае, когда ось резонатора находится под прямым углом к направлению распространения звука, как то следует из табл. 7, для $A_6 = 10$ *см*.

Наблюденные особенности явления можно выразить таким образом:

1) плоская волна, падающая на резонатор, стремится увести его в направлении движения, т. е. источник звука производит отталкивание резонатора;

2) это давление плоской волны на резонатор достигает максимума при полном резонансе и при переходе через него не меняет знака.

Приведенные здесь наблюдения с достаточной ясностью показывают, что взаимодействие возбуждающей волны и возбужденного в резонаторе колебания может быть рассматриваемо и изучаемо как ряд независимых друг от друга пондеромоторных сил, которые в общем случае налагаются друг на друга.

IV. Примечание, касающееся электромагнитных волн

Наблюдения показывают полное сходство пондеромоторного действия акустических и электромагнитных волн на соответствующие резонаторы в непосредственной близости источника колебания. Для плоских волн

законы для акустических резонаторов отличны; так как мне не удалось поставить соответствующие опыты для электромагнитных волн, я предполагаю, ниже в соответствии с моими прежними исследованиями об электромагнитных резонаторах[1] и сохраняя прежние обозначения, показать, что и в этом случае закон пондеромоторного действия изменяется таким же образом, как это вытекает из опытов с акустическими резонаторами. Рассмотрим здесь отдельно вращающие силы и силы давления плоских электромагнитных волн.

Величина вращающей силы и ее зависимость от резонанса вытекает из приведенных выше исследований[2], касающихся направления силовых линий возбуждающего поля и резонатора; эти вращающие силы подчиняются одним законам как в непосредственном соседстве с источником колебаний (случай, исследованный мною экспериментально), так и для плоских волн, именно: если резонатор настроен выше, то он будет вращаться так, что возбуждение его будет увеличиваться; если он настроен ниже, то вращение происходит в противоположном направлении. Ход явления, следовательно, тождествен с тем, что имеет место для акустических резонаторов.

Силы давления могут быть выведены из рассмотрения пространственного распределения поля сил вокруг резонатора и соответствующего возбуждения резонатора для каждого данного момента.

Если поляризованное тело находится в неравномерном поле, то оно будет двигаться в направлении, где соответствующая ему поляризация имеет наибольшее значение или противоположная ему — наименьшее: величина силы пропорциональна пространственному изменению силы поля и зависит от ориентировки поляризованного тела.

Состояние поляризации волн, падающих на неподвижный резонатор, как функция времени $f(t)$ выражается:

$$f(t) = a \cos at.$$

Пространственное распределение силы поля сводится к тому, что в пределах полуволны в ту и другую сторону (по направлению падающих волн, считая от резонатора) имеются всевозможные значения напряжения поля. В направлении движения волн, т. е. для состояний, соответствующих предшествующим (отрицательным) моментам, пространственное изменение силы поля там, где находится резонатор, для каждого данного момента пропорционально $f'(t)$.

$$f'(t) = + a \sin at.$$

Поляризация $\varphi(t)$, имеющая место в резонаторе, или ее слагающая, параллельная возбуждающему полю, может быть представлена в случае

---

[1] P. Lebedew. Wied. Ann., 52, p. 635, 1894.
[2] l. c. p. 636.

вынужденных стационарных колебаний, которые остаются после затухания собственных колебаний, следующим образом:

$$\varphi(t) = A \sin(at + a').$$

Импульс dp силы, действующей в направлении распространяющих волн, для каждого элемента времени dt

$$dt \doteq f'(t)\,\varphi(t)\,dt.$$

Для вычисления среднего значения силы давления P распространяем интеграл на большой промежуток времени; выполняя интегрирование и вставляя соответственные постоянные [1], находим

$$p = \frac{Ea^3\beta}{(b^2 + \beta^2 - a^2)^2 + 4a^2\beta^2}.$$

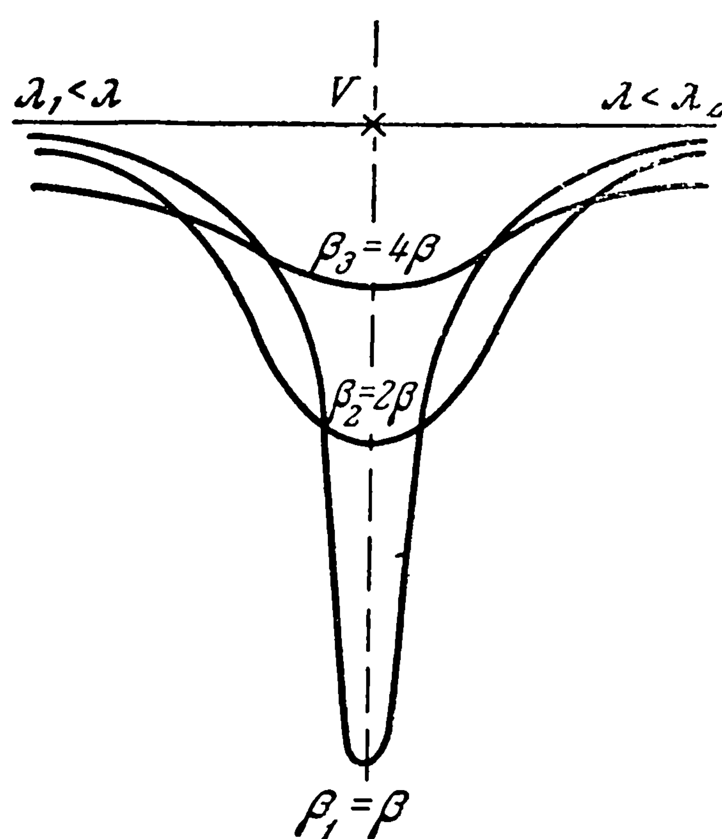


Рис. 30.

Здесь E пропорционально падающей за единицу времени на резонатор энергии, a — числу колебаний источника, b — числу колебаний резонатора и β — затуханию последнего.

Величина P всегда положительна, т. е. мы всегда имеем дело с отталкивательным действием источника волн, достигающим наибольшей величины при наибольшем резонансе; при прочих равных условиях отталкивательная сила в непосредственной близости резонанса обратно пропорциональна затуханию β, тогда как при больших отступлениях от резонанса она прямо пропорциональна этой величине. Ход изменения этой отталкивательной силы в соответствии с предыдущими исследованиями изображен на рис. 30 для постоянной длины волны источника колебаний и переменной длины волны резонатора; величина $\beta = 0{,}05\,a$. Представленные на рис. 30 кривые для различных затуханий β_1, β_2 и β_3 охватывают область $(a - b) = \pm 10\ \beta$.

Ясно, что и в этом случае ход явления для электромагнитных резонаторов тождествен с наблюдаемым для акустических резонаторов. Становясь на точку зрения электромагнитной теории, мы могли бы применить рассмотренные результаты к изучению отталкивательного действия Солнца на кометные хвосты, на что я уже ранее указывал [2]; к сожалению, у нас нет необходимых для вычисления данных относительно величин b и β.

---

[1] P. Lebedew. Wied. Ann., 52, p. 635, 1894.
[2] P. Lebedew. Wied. Ann., 45, p. 297, 1892

V. Заключение

Полная тождественность в действии пондеромоторных сил, которая экспериментально обнаружена для столь различных колебательных движений, каковы колебания электромагнитные, гидродинамические и акустические, показывает, что те элементарные законы, к которым сводятся наблюденные явления, должны быть независимы от физической природы данных колебаний и воспринимающих их резонаторов. В таком случае пределы приложимости найденных законов должны быть чрезвычайно расширены.

Главный интерес исследования пондеромоторного действия волнообразного движения лежит в принципиальной возможности распространить найденные законы на область светового и теплового испускания отдельных молекул тела и предвычислять получающиеся при этом междумолекулярные силы и их величину.

Покуда невозможно сказать, в каком направлении должны пойти дальнейшие исследования этих вопросов, чтобы достичь окончательного ответа самым коротким путем: нет никаких данных, позволяющих сказать что-либо определенное о свойствах молекул-резонаторов. Некоторые указания на то, где можно искать дороги с надеждой на успех, нам может дать только спектрально-аналитическое изучение процессов излучения.

6. ПРИБОР ДЛЯ ПРОЛОЖЕНИЯ[1] ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Графическое изображение звуковых колебаний, записанное фонаутографом Scott'a [1], представляет собою поучительное пособие на лекциях по акустике, но является доступным большой аудитории только в проложении снимков, полученных заранее. Чтобы избежать последнего неудобства, Rigollot [2] et Chavanon [2] предложили весьма простой и изящный способ непосредственно пролагать колебания перепонки на экран; для этого они передают колебания перепонки M (рис. 1) с помощью пяты K легкому зеркальцу s, вращающемуся около неподвижной горизонтальной оси a; пучок света, упавший на зеркальце s, отразившись, дает на экране светлое пятно, которое размывается в узкую вертикальную полосу, как только перепонка начинает дрожать; чтобы разложить это колебание на составляющие его волны, заставляют пучок света не прямо падать на экран E, а предварительно отразиться от большого плоского зеркала S, равномерно вращающегося около вертикальной оси A; покуда перепонка M находится в покое, пучок лучей чертит на экране яркую горизонтальную прямую; как только перепонка начинает колебаться, то на экране появляется волнообразная кривая: звук, улавливаемый ухом, является глазу изображенным в системе прямоугольных координат.

Так как аппарат, описанный Rigollot et Chavanon, является слишком деликатным прибором (благодаря чему он, вероятно, и не нашел значительного применения), то я позволю себе несколько подробнее описать прибор, построенный мною по тому же принципу для лекционных целей [3] и не раз испытанный на курсовых лекциях.

---

[1] Т. е. проекции. — *Прим. ред.*

[2] Rigollot et Chavanon. Journ. de Phys. (2) 2, p. 553, 1883.

[3] Прибор этот был демонстрирован на IX Съезде естествоиспытателей и врачей в Москве. В «Дневнике» съезда я назвал его «прибором Фрелиха» [3], так как только впоследствии узнал, что он был впервые предложен названными физиками.

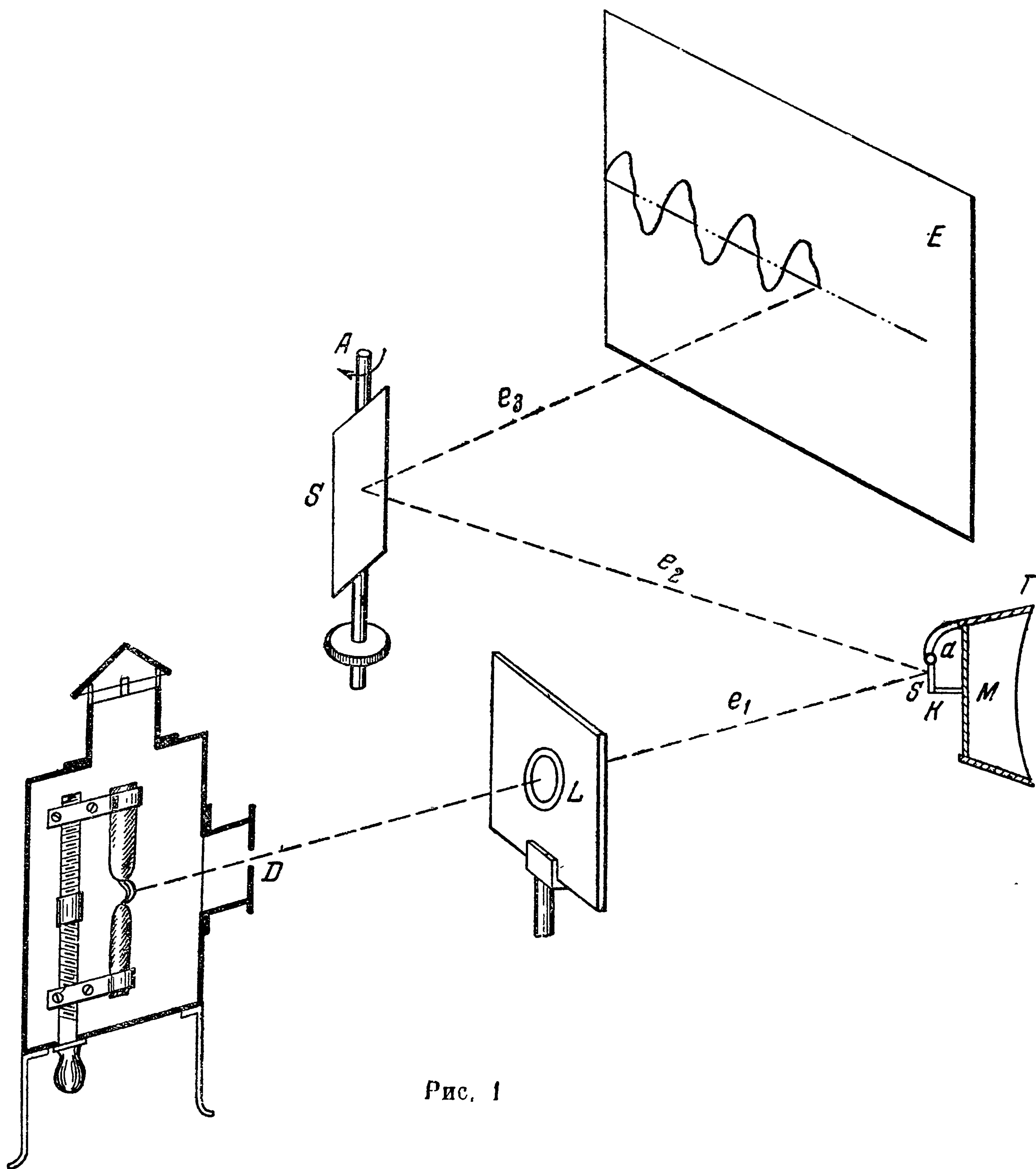


Рис. 1

Он изображен на рис. 2. Между двумя металлическими кольцами R_1 и R_2, к одному из которых привинчен короткий эбонитовый рупор T, в двух картонных прокладках защемлена шестью гайками тонкая пробковая пластинка M. Очень тонкое плоское (гальванометрическое) зеркальце s с легким трением входит в прорезы двух пробковых пластинок a_1 и a_2, привинченных к вилке G, и закрепляется нижним концом в прорезе пробковой пяты k, которая укреплена в центре пластинки M; при перемещении этой последней зеркальце вращается на малый угол в защемляющих его пластинках a_1 и a_2. Вилка G внизу снабжена пружиной F, так что

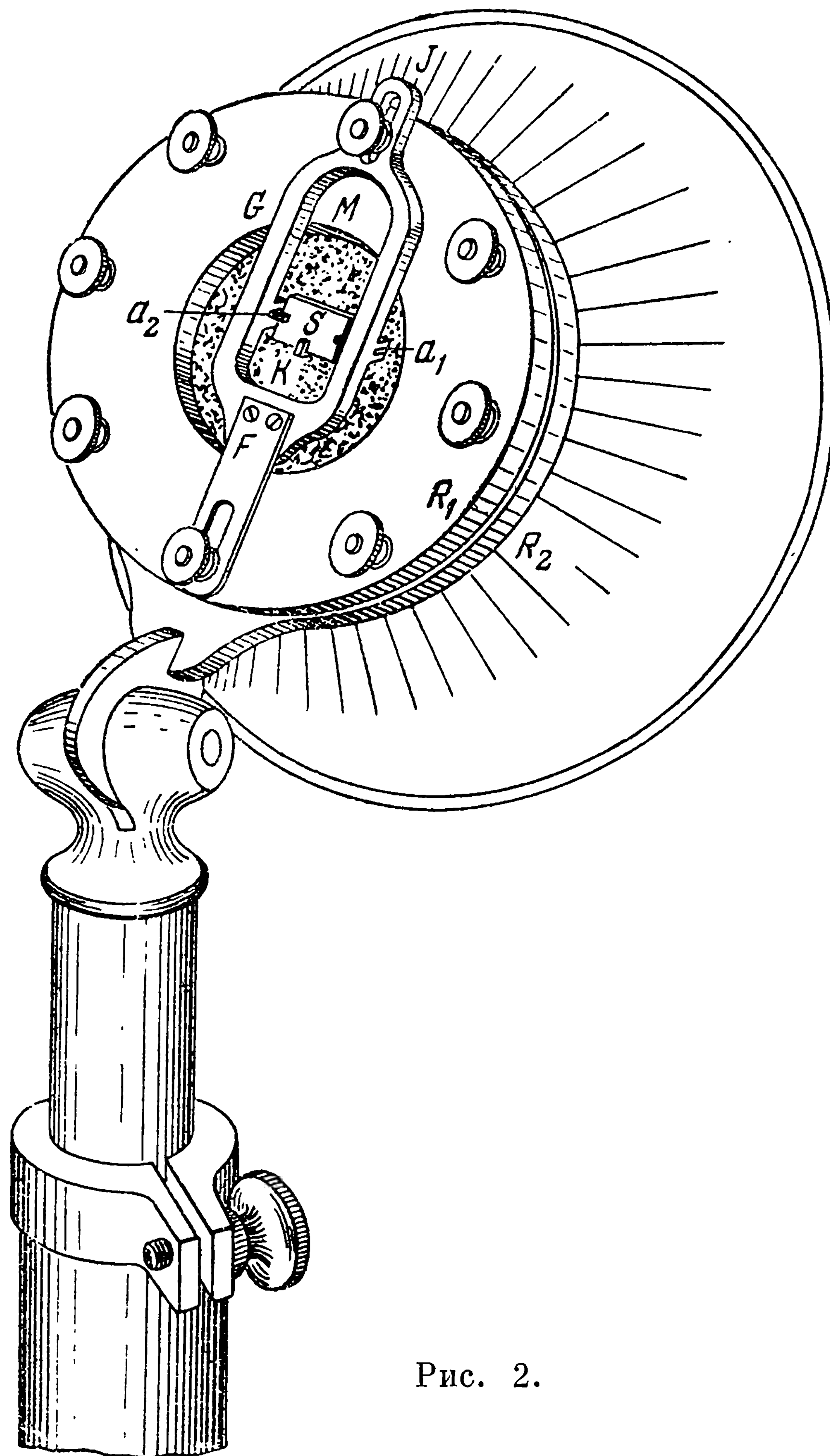


Рис. 2.

с помощью винта J всегда легко поставить зеркальце *s* приблизительно параллельно пластинке *M*; это приспособление необходимо ввиду того, что пробка *M* гигроскопична [1], легко коробится и сворачивает зеркальце

[1] Замечу, что поэтому при хранении прибора полезно зеркальце освобождать из пяты *K*. Если гигроскопичность и является недостатком пробки, то в акустическом отношении пробковая пластинка имеет значительное преимущество благодаря отсутствию собственных колебаний, в чем легко убедиться, если спеть перед прибором хроматическую гамму.

s; кроме того, как в пружине F, так и в верхней части вилки G сделаны продолговатые прорезы; благодаря им вилку можно перемещать вверх и вниз и изменять расстояние оси вращения от пяты. Весь прибор укреплен на тяжелой подставке и может вращаться около горизонтальной оси, а также подниматься или опускаться и закрепляться хомутиком. До начала опыта полезно удостоверяться в том, что зеркальце зажато в пробковых пластинках не слишком туго: при легком давлении на перепонку световое пятно должно подыматься на экране, не изменяя своей формы.

Что касается вращающегося зеркала S (рис. 1), то можно воспользоваться зеркальной призмой König'а [4], но у нее есть два существенных недостатка: один происходит от зубчатой передачи, которая вызывает легкое ритмическое дрожание прибора, что и сказывается в заметной зазубренности кривых на экране, а другой обусловливается небольшими неточностями в монтировке зеркал: они дают изображение пучка на разной высоте на экране, отчего при быстром вращении кривые прыгают по экрану и делают наблюдение весьма затруднительным. Я избежал этих неудобств, построив призму с 12 зеркалами, в которой наклонение каждого зеркала в небольших пределах изменяется особыми винтами; перед началом опыта легко установить все зеркала так, чтобы они отбрасывали пучок света возможно точно на одну и ту жу отмеченную точку экрана [1]; вся система приводится в равномерное вращение с помощью шнура маленьким электродвигателем или просто рукой.

Установка приборов видна на рис. 1. На фонарь Дюбоска, из которого вынуты все стекла, надета диафрагма D с малым отверстием; на большом черном экране, в котором вставлена ахроматическая линза L, получается обратное изображение электрической дуги, причем так, что кратер положительного угля проектируется на середину линзы; это условие необходимо, чтобы свету было достаточно, и за ним приходится следить во время опыта. Дальнейший ход луча обусловливается расположением приборов в зависимости от условий аудитории [2]. Скорость вращения зеркала легко регулировать так, чтобы волна не была ни слишком растянута, ни слишком сжата; удовлетворяя такому требованию, надо иметь в виду, что число отдельных кривых не должно быть более пяти в секунду (так как иначе они начнут сливаться); это легко достигнуть, уменьшая число зеркал до шести и до четырех (закрывая ненужные черным картоном).

Как только наивыгоднейшее расположение приборов для данной аудитории найдено, установка их не составляет затруднения.

---

[1] Не имея под руками платинированных зеркал, я пользовался обыкновенными: отражение от передней стеклянной поверхности мало мешает наблюдению главной кривой.

[2] Замечу, что в московской аудитории было $e_1 = 1{,}5$, $e_2 = 2$, $e_3 = 8$ *м*, фокусное расстояние линзы $L = 1$ *м*, число зеркал призмы $= 6$, изображение диафрагмы на экране $= 1{,}5$ *м* и амплитуда колебаний приблизительно 20 *м*; зеркальце прибора было от Steinheil'я (14×9 *мм*).

Вот ряд опытов, весьма легко демонстрируемых:

1) сила звука (постепенно слабеющее звучание камертона Ut_3);

2) высота звука (камертоны Ut_3, Mi_3 и Ut_4);

3) наложение звуковых волн (камертоны Ut_3 и Mi_3 вместе);

4) тембр (Ut_3: камертон, закрытая труба, язычковая труба, голосом гласные *a*, *e*, *i*, *o*, *u*);

5) гласные *a*, *e*, *i*, *o*, *u* (на разные ноты);

6) пение;

7) разговорная речь.

Я должен заметить, что для получения больших амплитуд надо хорошо возбуждать камертоны смычком и близко подносить их ящики к рупору прибора; также петь и говорить надо достаточно громко и близко — притом полезно набрасывать на рупор мягкую ткань (платок), чтобы влага дыхания не слишком сильно действовала на пробковую пластинку, и, наблюдая [1] получаемую кривую, соразмерять силу голоса.

Описанные приборы (без зеркал) были выполнены московским университетским механиком В. И. Чибисовым [5] вполне удовлетворительно.

Физическая лаборатория Университета.
Москва. Сентябрь 1894 г.

---

[1] Пользуясь плоским зеркалом, экспериментатор может увидеть экран при всяком расположении приборов.

7. О ДВОЙНОМ ПРЕЛОМЛЕНИИ ЛУЧЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛЫ

После того как Герц дал нам методы экспериментально проверить следствия электромагнитной теории света и тем открыл для исследования неизмеримую область, естественно появилась потребность делать его опыты в небольшом масштабе, более удобном для научных изысканий. Первые попытки в этом направлении сделал O. Lodge [1] [1], а затем, в последнее время, A. Righi [2] [1] выработал удобный метод, которым теперь многократно пользуются.

Мне удалось при дальнейшем уменьшении аппаратов получить и наблюдать электрические волны, длина которых не превосходила долей одного сантиметра ($\lambda = 0{,}5$ *см*) и которые были ближе к более длинным волнам теплового спектра, чем к электрическим волнам, которыми в начале пользовался Герц; при этих волнах можно пользоваться такими маленькими параболическими зеркалами, что призма для доказательства явления преломления может быть лишь немногим более одного сантиметра. Таким образом, явилась возможность распространить основные опыты Герца на кристаллические среды и пополнить их исследованием двойного преломления в кристаллах.

Еще надобно заметить, что явление двойного преломления электрических волн большей длины в дереве уже получено A. Righi [3]; оно обнаружилось в явлении эллиптической поляризации и ее зависимости от толщины слоя [4].

---

[1] O. Lodge. Nature, 41, p. 462, 1890.

[2] A. Righi. Memorie d. Acc. d. Bologna, (5) 4, p. 487, 1894.

[3] A. Righi, l. c., p. 565.

[4] Помещая между скрещенными зеркалами пластинку дерева (Мак [2]: Mack. Wied. Ann., 54, p. 342, 1895) или льда (Бернацкий [3]) так, чтобы волокна дерева или оси ледяных кристаллов составляли угол в 45° с осями зеркал, и наблюдая возбуждение резонатора во вторичном зеркале, еще нельзя заключить, что данное вещество двупреломляющее, т. е. что скорости двух составляющих луча различны: подобное яв-

I. ПРИБОРЫ

Общее расположение опыта было сделано по образцу классического расположения Герца: в фокусе цилиндрического зеркала возбуждалось электрическое колебание, а в фокусе вторичного зеркала находились два прямолинейных резонатора, с помощью которых и обнаруживался пучок электрических лучей; разница заключалась лишь в том, что линейные размеры приборов были в сто раз меньше. Такое уменьшение размеров приборов оказалось однако невозможным без некоторых изменений: так, первичному проводнику была дана форма, предложенная Righi, а возбуждение резонатора было обнаруживаемо не при помощи вторичной искры, как у Герца, а термоэлектрическим способом Клеменчича[1].

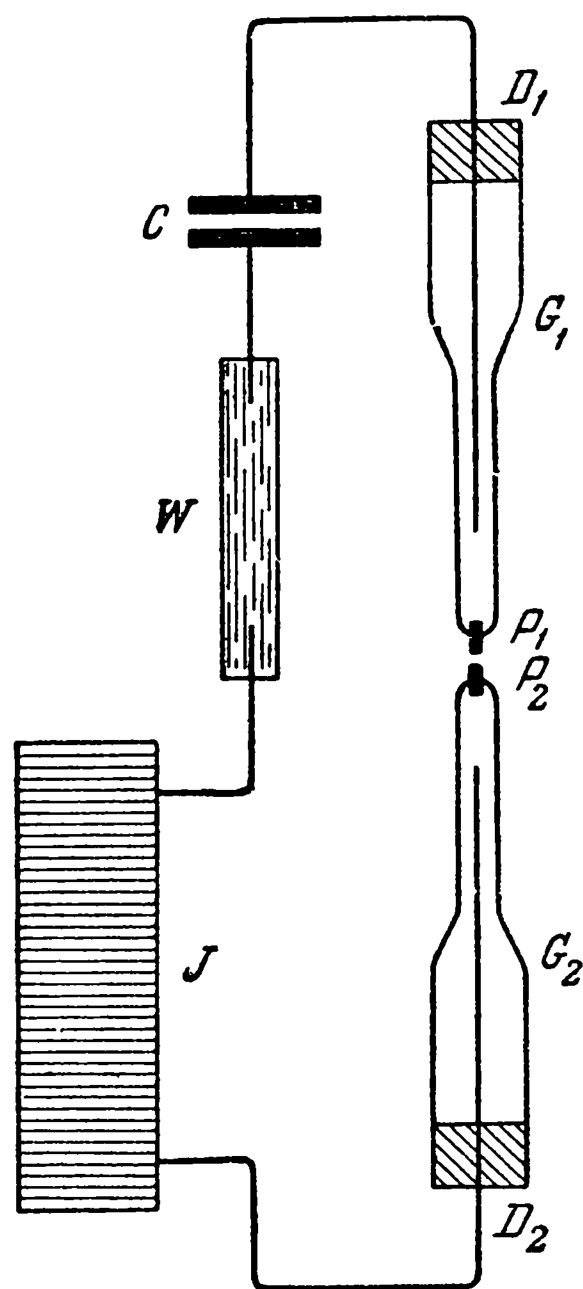


Рис. 1.

Первичный проводник (рис. 1) состоял из двух платиновых цилиндров P_1 и P_2 (каждый по 1,3 *мм* длины и 0,5 *мм* в диаметре), которые были впаяны в стеклянные трубки G_1 и G_2; заряды подводились искрами, которые перескакивали с проволок D_1 и D_2 на платиновые цилиндры. Первичный проводник находился в фокусе кругового цилиндрического зеркала (высота 20 *мм*, отверстие 12 *мм*, фокусное расстояние 6 *мм*)[2]; для того чтобы искра первичного проводника перескакивала в жидком изоляторе, все зеркало было погружено в керосиновую ванну, из которой пучок электрических лучей выходил в воздух через слюдяное окошко; длину первичной искры ($l = 0{,}02$ *мм*) можно было регулировать с помощью винта. В цепь небольшого индуктория (который давал 30 прерываний в секунду) был введен конденсатор C, для того чтобы избежать вредного для первичной искры разряда всего индуктория, и водяное сопротивление W.

ление может быть вызвано также и различной в различных направлениях проводимостью данной пластины, как это Герц показал для своей поляризационной решетки. Что описанное явление в дереве действительно обусловливается такой особенностью проводимости, показали исследования R i g h i (l. c.); может быть, что абсолютная величина проводимости речного льда в разных направлениях окажется ничтожною, и тогда для льда такой метод явится применимым; во всяком случае наблюдения при различных толщинах пластин, как то сделал Righi, и в этом случае будет необходимым контролем.

[1] I. K l e m e n č i č. Wied. Ann., **42**, p. 416, 1891; Wied Ann., 50, p. 175, 1893.

[2] Я пользовался круговым цилиндром, вместо параболического, как у Герца, ввиду более легкого изготовления.

С помощью второго параболического зеркала, которое было точной копией вторичного зеркала Герца (высота 20, отверстие 12, фокусное расстояние 1,4 *мм*) лучи концентрировались на два прямолинейных резонатора, из которых каждый имел длину в 3 *мм*. На обращенных друг

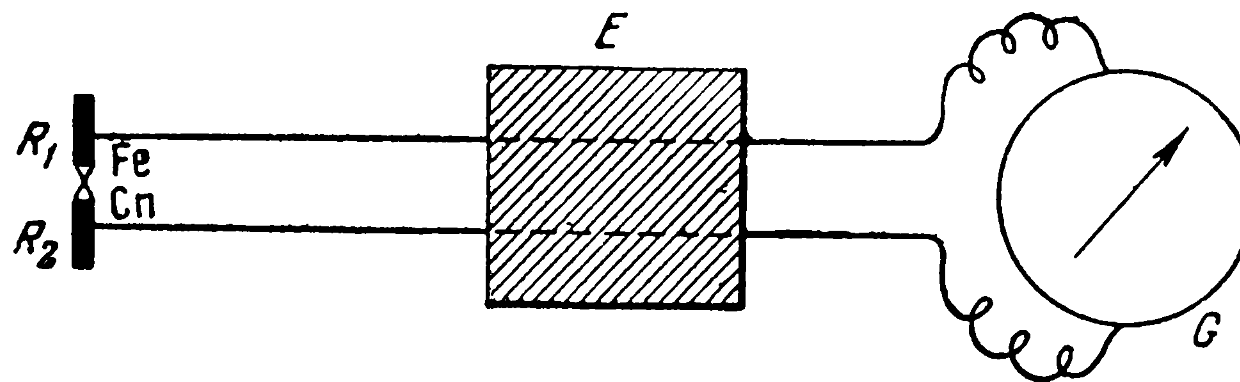


Рис. 2.

к другу концах резонаторов R_1 и R_2 (рис. 2) были припаяны петельки из очень тонкой проволоки ($d = 0{,}01$ *мм*), с одной стороны железной, с другой — константановой; петельки эти проходили друг в друга. По средине каждого резонатора (т. е. в узле его электрического колебания) была припаяна упругая проволока [1], укрепленная в эбонитовой пластинке E.

Когда резонаторы возбуждаются, то они частью разряжаются при каждом колебании через проволоки термоэлемента, нагревание которых измеряется первым отклонением очень чувствительного гальванометра. Вторичное зеркало было помещено в коробочку с слюдяным окошком, через которое свободно проникали лучи электрических колебаний.

Оба зеркала были помещены на спектрометре. Первичное зеркало было неизменно помещено на место коллиматора, и ось его постоянно оставалась вертикальною; вторичное зеркало, помещенное на место трубы, могло перемещаться по кругу, а также вращаться вокруг горизонтальной оси наподобие николя. Расстояние между зеркалами в большинстве случаев было 10 *см*, что соответствует 10 *м* у Герца.

II. ОСНОВНЫЕ ОПЫТЫ ГЕРЦА

Описанные аппараты позволяют без труда повторить основные опыты Герца.

a. Поляризация

Для опытов с поляризацией я пользовался четырехугольной решеткой (в 2 × 2 *см*), которая состояла из 20 тонких проволочек; опыты с параллельными и скрещенными осями зеркал были тождественны с таковыми же опытами Герца.

Подобная (несколько большая) решетка находилась на пути луча при всех описанных ниже опытах: вращая ее вокруг луча, мы не изменяем тех

[1] Эти проволоки, пружинясь, натягивали петельки термоэлемента и обусловливали их надежный металлический контакт.

случайных внешних сил, которые непосредственно действуют на стрелку гальванометра (например, магнитное действие индуктория и т. д.), и потому разница отклонений при двух главных положениях решетки исключительно обусловлена лучами электрической силы.

b. Интерференция

Пользуясь плоскими зеркалами, нетрудно измерить по методу L. Boltzmann'а [1] длину волны луча; за максимумом, который наблюдается при разнице ходов в 0 *см*, следует ясно выраженный минимум при 0,2—0,3 *см*, за которым следует слабый максимум при 0,5—0,6 *см*; при больших разницах ходов периодических изменений более не наблюдается, что указывает на значительное затухание электрических колебаний. По данным этого наблюдения, находим длину волны $\lambda = 0{,}6$ *см*, что вполне соответствует геометрическим размерам приборов.

c. Прямолинейное распространение

При расстоянии в 10 *см* между зеркалами легко исследовать прозрачность изоляторов (эбонит, слюда, стекло) и непрозрачность проводников (металлические пластины).

При удалении вторичного зеркала от первичного уменьшаются отклонения гальванометра, притом несколько более, чем прямо пропорционально расстоянию.

Резкого геометрического очертания луч не имеет; тем не менее направление луча можно легко определить с точностью до 3°.

d. Отражение

Для опыта с отражением достаточно иметь металлическое плоское зеркало в 2×2 *см*. Для того чтобы показать особенности анизотропных поверхностей, можно воспользоваться описанной поляризационной решеткой.

e. Преломление

Для того чтобы показать явление преломления, можно воспользоваться маленькой эбонитовой призмой (высота 1,8, ширина 1,2 *см*, преломляющий угол 45°), которая весит менее 2 *г* (тогда как у Герца вес призмы был 600 *кг*).

Призма была поставлена на столик спектрометра, первичное зеркало находилось от нее в 3 *см*, тогда как расстояние до вторичного было 7 *см*; наблюдения проводились, как обыкновенно, для двух положений наи-

---

[1] L. Boltzmann. Wied. Ann., 40, p. 399, 1890.

меньшего отклонения. Для определения направления отклоненного луча вторичное зеркало передвигалось по лимбу, и наблюдалось максимальное отклонение гальванометра. Металлическая диафрагма (шириною в 1,2 *см*), помещенная непосредственно перед призмой, не имела влияния на положение максимума, хотя самый максимум был в этом случае менее резко выражен; ввиду последнего обстоятельства измерения отклонений проводились без диафрагмы.

Угол отклонения оказался в 30°, откуда следует, что показатель преломления эбонита $n = 1{,}6$.

Квадратные корни из диэлектрических постоянных, найденных различными наблюдателями [1], для эбонита колеблются между 1,4 и 1,8. Если мы, следуя Герцу, и не будем приписывать абсолютной величине показателя преломления, найденного при помощи таких малых призм, особого значения, мы вправе тем не менее утверждать, что в пределах погрешностей наблюдения закон Максвелла имеет место.

III. ДВОЙНОЕ ПРЕЛОМЛЕНИЕ

Размеры описанных аппаратов позволили распространить основные оптические опыты и на кристаллические среды. Из различных кристаллов наиболее удобным для таких опытов оказалась естественная ромбическая сера, не только благодаря своим превосходным качествам изолятора, но и благодаря значительной разнице показателей преломления для обоих лучей. Так как ее диэлектрические постоянные в различных направлениях были определены Boltzmann'ом [2], то в последующем ориентировка материала дана по отношению к большей (D_g), средней (D_m) и меньшей (D_k) диэлектрическим осям.

a. Призматическое отклонение

Из двух хороших кристаллов были вырезаны две совершенно равные призмы (высота 1,8, ширина 1,3 *см* и преломляющий угол в 25°); преломляющее ребро первой было параллельно большой (D_g) оси, а второй — параллельно малой (D_k). Углы отклонения для электрических колебаний, параллельных преломляющему ребру, были определены тем же способом, как и для эбонитовой призмы; из этих измерений следует для серы:

$$n_g = 2{,}2_5\,;$$
$$n_k = 2{,}0_0\,.$$

Если по абсолютным величинам эти показатели, как указано выше, и отступают от истинных, то тем не менее разница их при данных условиях

[1] См. таблицы L a n d o l t ' a, 2. Aufl., p. 196, 1894.
[2] L. B o l t z m a n n. Wien. Ber., (II) 70, p. 342, 1874.

опыта исключительно обусловливается разной ориентировкой кристаллических осей.

Квадратные корни на диэлектрических постоянных, найденных Boltzmann'ом, суть

$$\sqrt{D_g} = \sqrt{4,77} = 2,18\,;$$
$$\sqrt{D_k} = \sqrt{3,81} = 1,95\,.$$

Эти опыты дают нам право утверждать, что электрические волны претерпевают в кристаллической сере двойное преломление и что для этой среды закон Максвелла имеет место.

К сожалению, я не располагал необходимым материалом для определения показателя преломления n_m.

b. Призма Николя

Найденные показатели преломления позволяют определить угол полного внутреннего отражения на границе эбонита для «среднего» показателя преломления серы и, пользуясь им, построить николь для электрических лучей. Этот николь был выполнен следующим образом: параллелепипед ($2 \times 2,\ 8 \times 1,2$ *см*) из кристаллической серы, диэлектрические оси которого были параллельны ребрам, был распилен по диагонали параллельно D_g и под углом в 50° к D_k; между полученными двумя частями была вставлена плоская эбонитовая пластина (толщина 1,8 *мм*; пучок лучей, идущий в направлении D_m, разлагается на две составляющих, из которых первая, параллельная D_g, претерпевает полное внутреннее отражение у эбонитовой пластинки и отклоняется в сторону, тогда как другая составляющая, параллельная D_k, беспрепятственно проходит.

С этим николем без всякого затруднения можно повторить известные оптические опыты.

Когда зеркала поставлены так, что оси их параллельны, то «поле темно» [1], покуда D_g параллельно осям зеркал (передвигая вторичное зеркало, можно убедиться, что в этом случае пучок отклонен); если повернуть теперь наш николь вокруг луча на 90°, то луч проходит и гальванометр тотчас дает отклонение.

Если оси зеркал скрещены, то гальванометр остается в покое, покуда николь занимает одно из главных положений; но достаточно повернуть николь на 45°, чтобы «поле осветилось» и гальванометр тотчас же дал отклонение.

---

[1] Затемнение в этом случае неполное — около 1/5 доли всей энергии проходит через николь, что вполне объясняется дифракцией.

c. Пластинка в четверть волны

Опыты с пластинкой $\lambda/4$, которые составляют основание всех интерференционных явлений кристаллической оптики, легко воспроизвести следующим образом: из куска кристаллической серы вырезается квадратная (2×2 *см*) пластинка, толщиною в 0,6 *см* так, чтобы оси D_g и D_k лежали в ее плоскости; для волн $\lambda = 0{,}6$ *см* разница фаз в такой пластинке равна $\pi/2$.

Если такую пластинку поместить между скрещенными зеркалами, то наблюдается следующее: покуда обе диэлектрические оси параллельны осям зеркал, гальванометр остается в покое — поле темно; но стоит только повернуть пластинку вокруг луча на 45°, чтобы получился циркулярнополяризационный луч и гальванометр тотчас дает отклонение.

Если в циркулярнополяризованный луч ввести другую $\lambda/4$ пластинку, притом так, чтобы одноименные оси пластинок были перпендикулярны, то гальванометр остается в покое — поле опять темно.

Опыты с более толстыми кристаллическими пластинками не дают явлений, аналогичных с известными оптическими явлениями; это объясняется тем обстоятельством, что употребляемые нами электрические волны, как указано выше, слишком быстро затухают.

Если число описанных опытов и невелико, то тем не менее они достаточны, чтобы иллюстрировать взгляды Максвелла на рапространение электрических колебаний в кристаллических средах, высказанные им еще в 1862 г., а также еще раз показать тождество в явлениях электрических и световых колебаний и в этом более сложном случае.

ДОПОЛНЕНИЯ

При описании указаннных выше опытов я предполагал возможным обойти некоторые подробности, которые не касаются основы этих исследований. Так как, однако, при повторении и дальнейшем углублении этих исследований подробности могут быть желательны, я позволяю себе описать их здесь более детально.

1. Первичный проводник

Из различных систем для первичного проводника наиболее подходящей оказалась система Righi. Подводки из плохо проводящих тел и разбавленных электролитов на месте воздушных искр Righi не ухудшали действия первичного проводника, но были неудобны по техническим соображениям.

Поддерживающей оправой для первичного проводника служила рама *RRRR* (рис. 3), которая была сделана из стеклянной трубки. К этой трубке приклеивались шеллаком обе половины G_1 и G_2 держателя, вставлявшиеся в цинковые оправы.

Подвинчивая винт V, можно было деформировать раму и таким образом регулировать длину первичной искры ($l = 0{,}02$ *мм*) с достаточной точностью; при этом наиболее деятельная первичная искра имела вид слабой звездочки.

Следует еще заметить, что обе половины первичного проводника должны быть вмазаны очень прочно, так как при образовании первичной искры керосин моментально испаряется и стремится с большой силой раздвинуть обе половины первичного проводника и изменить наивыгоднейшую длину искрового промежутка.

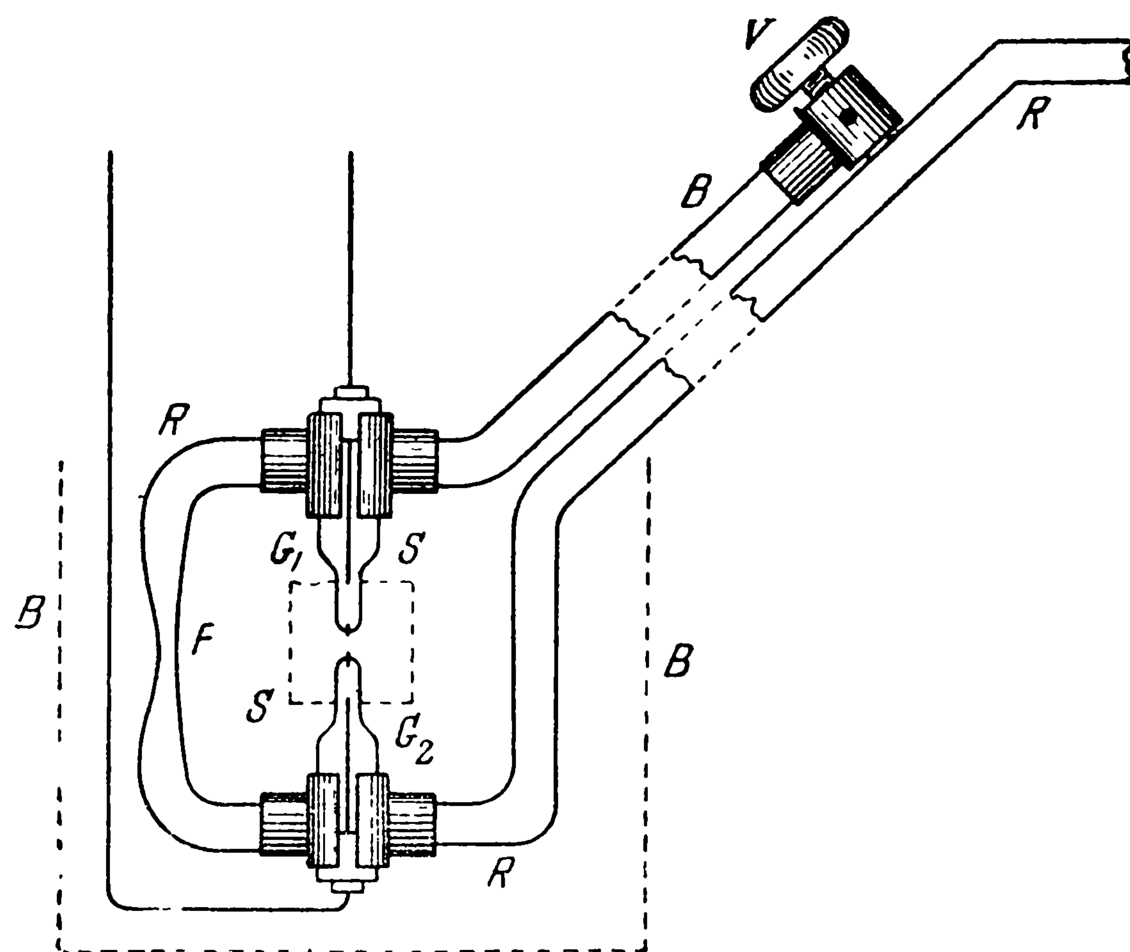


Рис. 3.

К той же самой раме $RRRR$ прикреплено и первичное зеркало SS; чтобы установить первичный проводник точно в фокальной линии зеркала, служил шаблон (рис. 4).

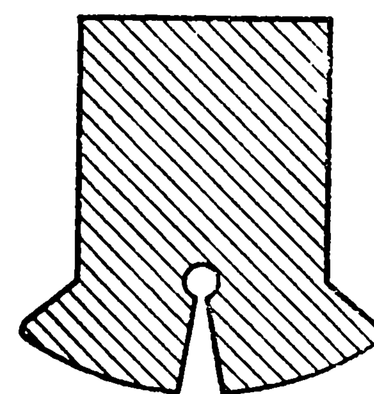


Рис. 4.

Первичный проводник был помещен несколько ближе к зеркалу, чем на половину его радиуса кривизны, чтобы исправить ход краевых лучей.

Затем рама была погружена в керосиновую ванну BB (рис. 3). Это расположение имеет существенные преимущества еще и в том отношении, что для заданного периода длина волны в керосине меньше, чем в воздухе, и потому при заданных размерах зеркала диффракционные явления будут значительно слабее.

Первичные проводники должны быть часто возобновляемы, так как из-за распыления платины они приблизительно через 100 замыканий становятся негодными.

Во всем исследовании наибольшего попечения и внимания требует первичный проводник, так как его возбуждение очень сложным, не поддающимся описанию образом зависит от того, как подводится к нему электричество.

Из всех расположений, которые я имел возможность испытать, оказалось на деле наилучшим описанное выше (см. рис. 1, стр. 128). Размеры конденсатора C и водяного сопротивления W зависят от применяемого индуктория (и от регулировки его прерывателя); наивыгоднейшие размеры находятся при одновременном изменении обоих аппаратов. Для индуктория [1], которым я пользовался, и который был снабжен прерывателем Депре и от 8 аккумуляторов давал максимальную искру в 12 *см*, было вполне достаточно одной Лейденовской банки, сделанной из стеклянной трубки ($d = 1$ *см*) и имевшей обкладки из цинка всего лишь в 5 *см* высоты. Сопротивлением служила водяная колонна 5 *мм* в диаметре и 20 *см* длины.

Из предварительных исследований, которые я проводил с различными первичными проводниками, выяснилось, что наивыгоднейшая длина первичной искры в грубом приближении пропорциональна длине волны. При разрядных явлениях подобного рода нет возможности указать количественную зависимость между длиной искрового промежутка и размерами проводников, с одной стороны, и излучаемой энергией, с другой стороны. Можно было бы приблизительно оценить эту зависимость так: при удвоении длины волны излучаемая энергия увеличивается в 10 раз (благодаря чему исследования тотчас же становятся гораздо легче). Дальнейшему уменьшению длины волны препятствуют большие трудности. Наименьшие аппараты, с которыми я мог еще получать заметные действия, соответствовали длине волны в 3 *мм*. Ничтожное количество излучаемой энергии и технические трудности при изготовлении аппаратов удержали меня от дальнейшего уменьшения длины волны.

Если применить для данного резонатора больший первичный проводник, как это указал Righi [2], то возбуждение резонатора увеличивается. Так как, однако, основное колебание здесь более медленное, то все диффракционные явления при описанных размерах зеркала настолько усиливаются, что пучок параллельных лучей становится очень размытым.

2. Резонаторы

При выборе метода наблюдения я сравнил методы болометрический и термоэлектрический и нашел последний метод более чувствительным. Это объясняется тем, что при уменьшении размеров чувствительность болометра уменьшается, между тем как чувствительность термоэлемента остается постоянной.

Резонаторы вместе с подводящими проволоками могут быть сделаны проще всего, если, согнув соответствующим образом конец проволоки (как в увеличенном масштабе показывает рис. 5), мы заполним проволочную петлю мягким припоем [3].

---

[1] От Carpentier в Париже.

[2] A. Righi. Memorie d. R. Accad. di Bologna, (5) 4, p. 500, 1894.

[3] Толщина резонатора должна быть меньше чем треть его длины.

Изготовление термоэлементов из очень тонких проволок ($d = 0{,}01$ *мм* приблизительно) кажется на первый взгляд гораздо более трудным, чем это оказалось после некоторого упражнения. Покупные проволоки из константана и железа ($d = 0{,}025$ *мм*)[1] осторожно стравливались в слегка нагретой и разбавленной царской водке, и их диаметр измерялся при помощи микроскопа с окулярным микрометром, увеличивавшего в 20 раз.

Резонаторы, монтированные предварительно на эбонитовой пластинке, зажимались вместе в струбцинку и на них накладывались перевитые друг с другом проволоки[2] термоэлемента; они припаивались к ним при помощи паяльной жидкости и мягкого припоя. Так как паяльник должен быть очень мал, то необходимо его все время прогревать при помощи маленького связанного непосредственно с ним газового пламени. При малых размерах не очень легко сразу придать термоэлементу нужные размеры, и поэтому можно рекомендовать сделать несколько пар резонаторов, чтобы иметь возможность выбрать наилучшую.

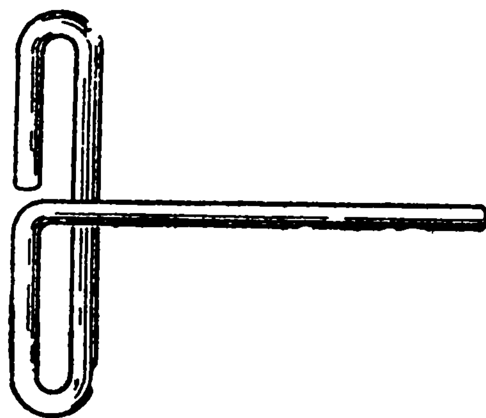


Рис. 5.

После того как бывает смыта паяльная жидкость, оказывается обыкновенно, что термоэлемент не проводит гальванического тока. Если мы включим такой термоэлемент между полюсами вторичной катушки индуктория, то достаточно замкнуть первичный ток на одно мгновение, чтобы получить в термоэлементе прочный металлический контакт. Гальваническое сопротивление такого термоэлемента лежало между 0,5 и 2,0 *ом*.

Чтобы увеличить чувствительность термоэлементов, я с успехом пробовал впаивать резонаторы в стеклянные шары, из которых затем воздух по возможности выкачивался при помощи ртутного насоса Шпренгеля [4], после чего они запаивались. Таким образом значительно понижалась скорость охлаждения термоэлементов и соответствующим образом увеличивалась их чувствительность. Резонаторы впаивались таким образом, что они находились в фокусе шаровой поверхности стеклянного шара, посеребренного с его внешней поверхности. Хотя этот метод представляет значительные экспериментальные преимущества, я все-таки счел нужным провести работу с резонаторами, помещенными в воздухе, чтобы оставаться возможно ближе к расположению Герца.

---

[1] Выписаны от H a r t m a n n u. B r a u n в Боккенгейме около Франкфурта-на-Майне.

[2] Концы проволок каждой петли термоэлемента должны быть по возможности близки друг к другу, чтобы промежуток между ними был возможно мал по сравнению с толщиною резонатора. Иначе обнаруживается сильное влияние на собственный период колебания резонаторов. Рис. 1 (стр. 128) должен быть поэтому рассматриваем лишь как схема.

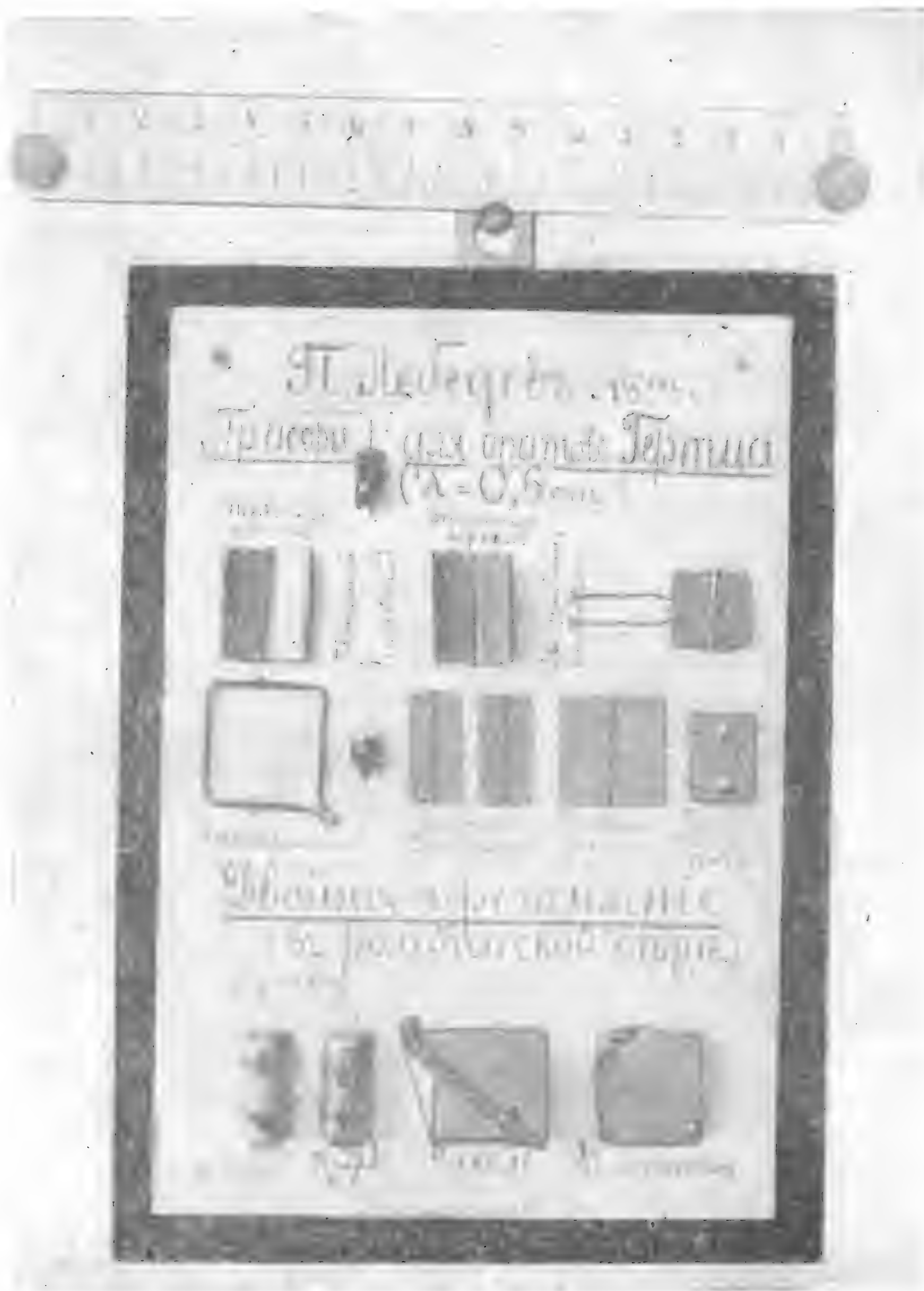


Рис. 6. Приборы П. Н. Лебедева, служившие для опытов с короткими волнами Герца

3. Гальванометр

Неизбежные колебания температуры термоэлемента и более равномерное функционирование первичного проводника при кратковременных замыканиях требовали применения гальванометра с малым периодом ($\tau/2 = 3$ *сек*). Чрезвычайно удобным оказался гальванометр Дю-Буа-Рубенса с исключительной легкой системой стрелок (длина магнитов равна 3 *мм*). Внешние магнитные возмущения были ослаблены приблизительно в 5 раз при помощи цилиндра из железной жести (толщина стенки приблизительно 2 *см*), который был надет на гальванометр вместо стеклянной защиты.

4. Вредные влияния

Если поляризационная решетка поставлена так, что электрические колебания не могут достигнуть резонаторов, то отклонение гальванометра может все-таки вызываться целым рядом вредных побочных причин. Полезно по возможности уменьшить эти отклонения до 1—2 делений.

a. Магнитные силы, которые зависят от индуктория и подводящих проволок, можно сделать безвредными, придав соответствующее положение индукторию и обвив друг около друга подводящие провода.

b. Электростатические силы, зависящие от подводок к первичному проводнику, могут наводить в цепи термоэлемента периодические заряды, которые, выравниваясь через термоэлемент, могут вызвать отклонения гальванометра. Эти отклонения можно значительно уменьшить, перевивая проволоки цепи термоэлемента и защищая вторичное зеркало металлическим чехлом, отведенным к земле.

c. Электрические колебания большой длины волны в случае, если таковые возникают в подводках к первичному проводнику (например, вследствие побочных искр) и начинают влиять индуктивно на цепь термоэлемента, вызывают при некоторых обстоятельствах громадные отклонения гальванометра.

d. Тепловое излучение первичного проводника, которое отражается и преломляется по тем же законам, что и электрические колебания, настолько незначительно, что не вызывает заметного нагревания термоэлемента.

5. Наблюдения

Медленные изменения нулевой точки гальванометра, обусловленные колебаниями комнатной температуры, не оказывают вреда, так как при коротком периоде колебаний ($\tau/2 = 3$ *сек*) отклонение гальванометра может быть легко определено с точностью до одного деления.

Значительно бо́льшая неточность обусловливается непостоянством

первичной искры [1]. Эта неточность может быть ослаблена соответствующим порядком наблюдений, причем отдельные измерения сравниваются с одним определенным измерением: таким образом можно без труда редуцировать все наблюдения на некоторое постоянное возбуждение первичной искры; примером может служить одно определение положения отклоненного луча для призмы из серы (P_g).

В табл. 1 даны наблюденные отклонения гальванометра в делениях (собственно разности отклонений при двух положениях решетки). Под φ° подразумеваются положения вторичного зеркала на круге спектрометра. Стрелками обозначен порядок наблюдений. Первичная искра регулировалась во время наблюдений четыре раза.

Таблица 1

φ°	I регулировка			II регулировка				III регулировка					IV регулировка			
140		13			14		6							13		
145	↗	↓		↗	↓	↗	↓	↗	22	↗	8		↗	↓	10	7
150	20	13	7	14	22	12	8	21	18	9	7	5	22	15	11	7
155		↓			↓	↗			8	↗	3	↗				
160		3	↗		5											

Если мы сделаем предположение, что первичная искра изменяется равномерно, то можно наблюденные отклонения обычным образом редуцировать на постоянное возбуждение первичной искры (20 делений при φ° = 150°). Табл. 2 дает редуцированные отклонения.

Таблица 2

φ°	I регулировка			II регулировка				III регулировка					IV регулировка				Средние значения
140		16			15		12							14			14
145									21		20				16	15	18
150	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20
155									11		10						10
160		6			6												6

[1] Главным образом это непостоянство обусловливается, по-видимому, недостаточно прочным соединением двух половин первичного проводника с рамой, что и дает о себе знать весьма быстрым увеличением первичной искры.

Таким же точно образом наблюдалось и другое положение наименьшего отклонения призмы.

В табл. 3 сопоставлены средние значения двух [1] рядов наблюдений для обеих призм (P_g и P_k); результаты графически изображены на рис. 7.

Таблица 3

$\varphi°_1$	P_g	P_k	$\varphi°_2$	P_g	P_k
140	14	6	200	10	20
145	18	17	205	14	22
150	20	20	210	20	20
155	10	21	215	23	17
160	6	15	228	18	13

Из рис. 7 получаются следующие значения для максимальных отклонений:

$$P_g = 148 \quad \text{и} \quad 214°;$$

$$P_k = 153 \quad \text{и} \quad 205°.$$

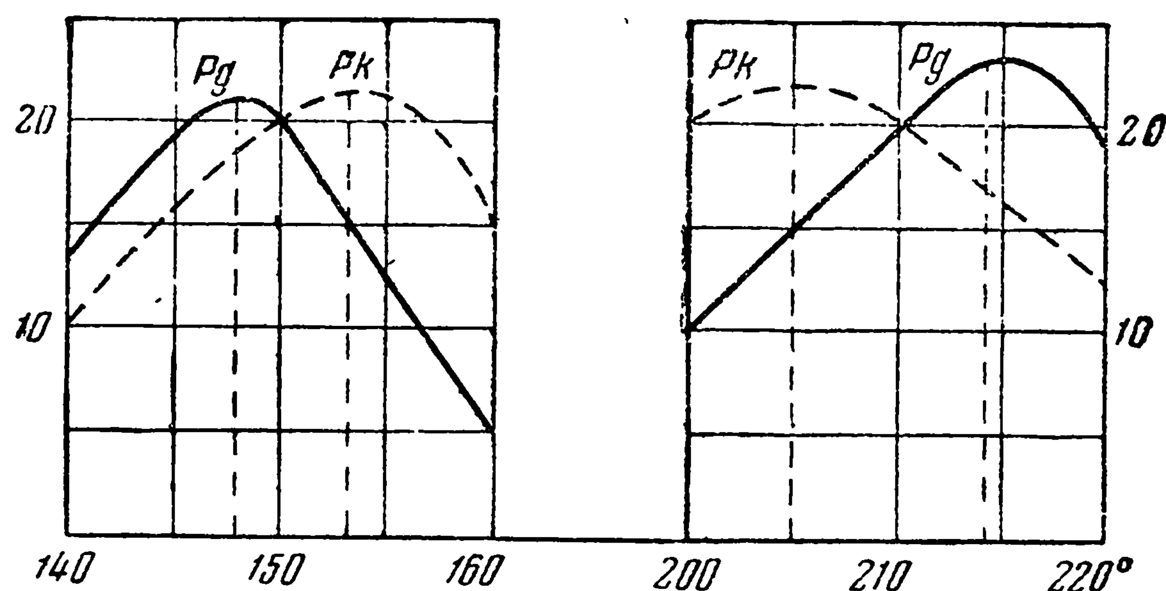


Рис. 7.

Отсюда для показателей преломления ($\alpha = 25°$) вычисляются величины

$$n_g = 2{,}2_6;$$

$$n_k = 2{,}0_6.$$

Все остальные наблюдения были выполнены и редуцированы тем же самым способом.

[1] Второй ряд был получен с новым первичным проводником.

6. Препараты из серы

Натуральная кристаллическая сера[1] требует при своей обработке соблюдения некоторых мер предосторожности, так как она не выдерживает без растрескивания даже самых ничтожных местных нагреваний, какие вызываются распиливанием или даже при прикосновении к ней руками.

Если весь кристалл может быть предназначен для выделки только одного препарата, то работа легко, быстро и точно осуществляется, сошлифовывая кристалл на куске натянутой наждачной бумаги. Если же необходимо из одного и того же кристалла приготовить 2 препарата, то полезно в данном направлении наметить два разреза, отстоящие друг от друга приблизительно на 2 *мм*, и не слишком тонким лобзиком попеременно с осторожностью пилить то по одному, то по другому разрезу: хотя кристалл и трескается под пилою, но эти трещины всегда проникают в сравнительно слабый промежуточный слой. Дальнейшая обработка происходит шлифованием.

При постоянном контроле с помощью гониометра, углы легко могут быть получены с точностью до 1°.

* * *

В заключение можно еще указать, что короткие волны пригодны для обширных применений, так как здесь с приборами средних размеров, безукоризненными в оптическом отношении, дифракционные явления могут быть вполне отодвинуты на задний план, и незначительные количества исследуемых веществ уже достаточны для точных измерений. Таким образом те простые условия, к которым мы привыкли при оптических исследованиях, могут быть осуществлены в оптике герцевских колебаний.

---

[1] Кристаллы серы выписаны от J. Böhm'а (торговля минералами) из Вены.

8. ЗАМЕТКА О РАБОТЕ ИНДУКТОРИЕВ И КАМЕРТОНОВ ОТ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При употреблении аккумуляторов в физической лаборатории, где работа, ложащаяся на отдельные элементы, может быть совершенно различна по величине, где их для зарядки необходимо переносить с места на место, в связи с этими обстоятельствами возникают очень существенные затруднения. Поэтому всегда выгодно иметь возможность присоединять непосредственно к главной сети такие аппараты, для которых не имеют большого значения те незначительные колебания напряжения, которые здесь всегда имеют место.

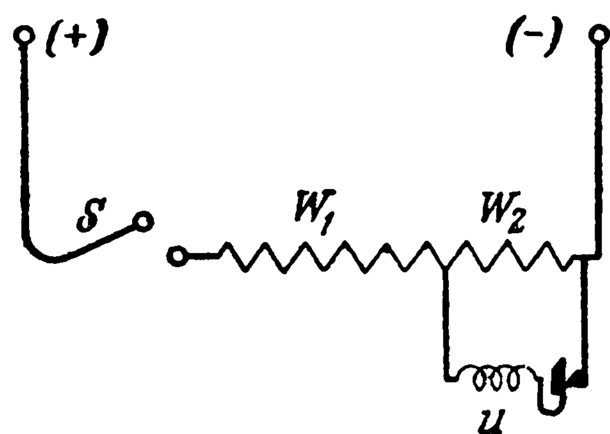


Рис. 1.

Для аппаратов, которые работают с прерывателями (индуктории, камертоны), принятое обыкновенно в сетях постоянного тока напряжение 100—110 *в* слишком высоко, так как, если ток не слишком слаб, на месте искрового перерыва образуется вольтова дуга.

Устраивая ответвление от соответствующего сопротивления, можно установить любое нужное в данном случае напряжение: (+) и (—) обозначают на рисунке полюсные клеммы, $(w_1 + w_2)$ — реостат, рассчитанный на большую силу тока, s — ключ и u — приводимый в действие аппарат (рис. 1).

Опыты показали, что при постоянном токе в 105 *в*:

а) для среднего индуктория с прерывателем Фуко (длина разрядной искры $l = 15$ *см*) можно взять $w_1 = 5$ *ом*, $w_2 = 2$ *ом*;

б) для маленького индуктория с прерывателем Депре (длина разрядной искры $l = 2$ *см*) $w_1 = 16$ *ом*, $w_2 = 4$ *ом*;

в) для камертона с платиновым контактом можно было вместо сопротивления w_1 взять три 16-свечовых лампы накаливания [1]; сопротивление

$w_2 = 5$ *ом* было сделано из тонкой ($d = 0{,}1$ *мм*) нейзильберовой проволоки.

Этот метод имеет принципиальный недостаток: для той же самой средней силы тока в аппарате напряжение на прерывателе больше, чем при применении аккумуляторов. Этот недостаток, не ведущий, впрочем, ни к каким практическим неудобствам, возмещается следующими выгодами:

1) реостат всегда готов к работе;

2) он удобен, опрятен, легко может быть переносим и позволяет регулировку тока в широких пределах;

3) в то время когда он не работает, он не требует никакого попечения;

4) не только издержки по его приобретению, но и расходы при его работе оказываются гораздо ниже, чем для аккумуляторов.

Хотя описанный метод и очень прост и сам собою понятен, я все-таки считал возможным кратко указать здесь на него, потому что ряд моих исследований убедили меня в его полной пригодности.

Физическая лаборатория Университета.
Москва. Март 1896 г.

9. ОБ ОТКРЫТЫХ РЕНТГЕНОМ Х-ЛУЧАХ[1]

Еще никогда ни одно открытие в области физики не встречало такого всеобщего интереса и не было так обстоятельно обсуждаемо в периодической печати, как открытие Рентгеном нового, до той поры неизвестного рода лучей: через две-три недели после того, как проф. Рентген (Röntgen) сделал «предварительное сообщение» о своем открытии в Физико-математическом обществе в Вюрцбурге (в декабре 1895 г.), вся европейская печать заговорила об Х-лучах.

Причину такого интереса надо искать как в применении лучей Рентгена для медицинских целей и тех смелых надеждах, которые возлагали на новый диагностический метод, так и в возможности делать снимки с невидимых глазу предметов весьма простым и легко доступным способом. Все внимание было обращено на одну частную особенность явления: на различную степень прозрачности тел для новых лучей; другие свойства Х-лучей, о которых сообщил Рентген, как мало демонстративные, не могли возбудить общий интерес, несмотря на то что именно в их исследовании и кроется сущность открытия немецкого ученого, его огромная заслуга.

Оценить значение нового открытия, ясно представить себе то обособленное положение, которое занимают Х-лучи среди всех других известных нам видов распространения энергии, и ту роль, которую они могут играть в решении целого ряда вопросов,— все это доступно, конечно, только физику-специалисту, хорошо знакомому с современным состоянием науки. Для лиц, мало знакомых с физикой, открытие Рентгена представляет собой иной и, может быть, не меньший интерес, позволяя хоть на некоторое время перенестись в лабораторию ученого и проследить, как шаг за шагом развивается исследование, в какой последовательности идут друг

---

[1] Из публичной лекции, читанной 29 января и 8 февраля 1896 г. в физической аудитории Московского университета.

за другом отдельные опыты. Отсылая читателей, желающих ознакомиться более подробно с исследованием проф. Рентгена, к его оригинальной статье [1], мы остановимся лишь на главных пунктах работы, которые позволят нам выяснить самый прием исследования.

Прежде чем говорить о том наблюдении, которое послужило Рентгену точкой отправления его исследований, скажем несколько слов о явлении самосвечения под влиянием электрических разрядов.

Флуоресценцией мы называем то самосвечение многих твердых и жидких тел, которое возбуждается в них лучами света и прекращается вместе с освещением; так, в солнечных лучах урановое стекло светится зеленым, керосин — голубым, спиртовой зеленый раствор хлорофилла — красным светом, и всегда это свечение пропадает, как только мы на пути освещающих лучей поставим непрозрачное для света тело (например, лист картона или металла).

Те же явления флуоресценции твердых тел можно возбуждать не только посредством света, но также и с помощью электрических разрядов: заставляя разряд большой катушки Румкорфа проходить между проводниками, впаянными в стеклянную трубку любой формы, мы заметим, что в том случае, когда давление газа внутри трубки очень мало и не превышает одной миллионной доли нашей атмосферы, каждый разряд бобины сопровождается свечением (флуоресценцией) некоторой части стеклянной оболочки или какого-нибудь тела, помещенного внутри [2].

Рентген, исследуя действие флуоресцирующего стекла такой круксовой трубки нашел, что оно, в свою очередь, возбуждает свечение в телах, способных флуоресцировать, даже если они находятся на значительном расстоянии от трубки; особенно ярко светится при этом двойная циановая соль платины и бария, почему ею и покрывают бумагу для получения флуоресцирующих экранов.

Но помещая между флуоресцирующею трубкой и экраном лист совершенно непрозрачного картона, мы не остановим флуоресценции экрана, как в опыте со светом; чтобы убедиться, что не светом обусловливается флуоресценция экрана, Рентген поместил такую трубку в непрозрачный картонный ящик и увидел, что в совершенно темной комнате экран продолжал все время ярко светиться, пока флуоресцировала трубка. Описанный опыт не мог быть объяснен ни одним до сих пор известным физическим явлением, и Рентген приступил к систематическому изучению его; попробуем и мы проследить тот прямой путь, которым шел исследователь.

Итак, это таинственное «действие» флуоресцирующей трубки на экран не задерживается картоном и воздухом; но пропускают ли его другие тела?

---

[1] Рентген. Новый род лучей (перевод М. Псалти. Москва, 1896).

[2] Флуоресценция при электрических разрядах была всесторонне изучена в 1873 г. английским физиком Круксом [1] (Crookes), который показал, что электрическое действие, возбуждающее флуоресценцию, исходит от отрицательного полюса (катода) и распространяется внутри трубки прямолинейно («катодные лучи»).

Оставаясь в темной комнате своей лаборатории, Рентген легко мог исследовать этот вопрос: он помещал между ящиками с трубкой и экраном различные тела и убедился, что все тела, хотя и в очень разной степени, пропускают это действие: так, книга в тысячу страниц, толстая деревянная доска, пластинка алюминия пропускают значительную долю этого действия, тогда как, например, свинцовый лист в два миллиметра толщиной задерживает его совершенно. Исследуя таким образом длинный ряд тел, Рентген нашел, что величина



Рис. 1.



Рис. 2.

поглощения колеблется в очень широких пределах и зависит как от химической природы испытуемого вещества, так и от толщины слоя,— в достаточно тонких слоях все тела оказались прозрачными.

Сказывается ли это таинственное действие флуоресцирующей трубки в каких-нибудь явлениях, помимо свечения описанного экрана?

Заменяя экран другими телами, Рентген нашел, что не только ряд тел, способных флуоресцировать (стекло, каменная соль и т. д.), начинают светиться более или менее сильно, но что также и чувствительный слой фотографической пластинки испытывает те же изменения, как и под влиянием света: Рентген без труда мог закреплять на пластинке все те явления, которые он наблюдал, пользуясь экраном, и тем создал новый замечательно удобный метод исследования самого явления; пользуясь им, можно делать исследования в освещенной комнате, не пряча трубку в ящик, и экспонировать пластинки, завернутые в черную бумагу или помещенные в кассетах: обложки, непроницаемые для света, позволяют этому действию трубки беспрепятственно достигать пластинки, как показали исследования «прозрачности» тел.

После того как был установлен факт, что действие флуоресцирующей трубки передается на расстояние, естественно явился вопрос, каким образом, по каким законам распространяется это действие? Распространяется ли оно подобно текучей жидкости или звуку, огибая встречающиеся препятствия, или распространяется оно прямолинейно, лучами, подобно свету, обрисовывая тени непрозрачных предметов?

Очень простой опыт позволил Рентгену разрешить этот вопрос: помещая на некотором расстоянии от флуоресцирующей трубки более или менее непрозрачные тела, он наблюдал вполне отчетливые силуэты их на флуоресцирующем экране (или на фотографической пластинке), тождественные с теми, которые мы наблюдаем при освещении тел; нет сомнения, следовательно, что это новое действие распространяется прямолинейно, подобно лучам света, почему Рентген и присвоил ему название «икс-лучей», подчеркивая таким названием то обстоятельство, что природа этих новых лучей является для нас искомым неизвестным.

Но обладают ли эти новые лучи теми же свойствами, какими обладают лучи света? Отражаются ли они от полированной поверхности, находящейся на их пути, как от зеркала? Отклоняются ли они от своего первоначального направления, проходя через призму, преломляясь в ней?

Опыты, предпринятые Рентгеном в этом направлении, показали, что Х-лучи только в слабой степени отражаются как от полированных, так и от матовых поверхностей, причем это отражение по характеру своему ближе подходит к рассеянному отражению света от шероховатых поверхностей, чем к правильному зеркальному его отражению.

Чтобы исследовать и другой вопрос, Рентген ставил на пути Х-лучей призмы из различных для них прозрачных веществ совершенно так, как мы это делаем в опытах со светом, но увидел, что присутствие призмы не влияет заметным образом на направление Х-лучей: они проходят через все исследованные тела, не преломляясь. Рентген указывает на то, что малые отклонения не могли быть замечены в этих опытах, но добавляет, что отклонения, в десять раз меньшие, чем отклонение света в стеклянной призме, вне сомнения, были бы обнаружены; во всяком случае, это преломление, если оно существует, так мало, что мы не можем собирать Х-лучи линзами так, как мы собираем лучи света.

Ставя себе с тою же последовательностью ряд других вопросов, рассмотрением которых мы не можем тут заняться в виду их специального характера, Рентген так же осторожно шаг за шагом двигался вперед, изучая свойства открытого им явления.

Его маленькое «предварительное сообщение», которое занимает едва десять печатных страничек в отчетах Вюрцбургского физико-математического общества, произвело в среде ученых до сих пор никогда не виданную сенсацию и было встречено с замечательным воодушевлением: все спешили повторить основные опыты Рентгена, чтобы самим увидать это таинственное явление, пытаясь, насколько возможно, отдать себе в нем отчет,

и скоро во все академии наук стали поступать сообщения о том или другом исследовании X-лучей.

Здесь, конечно, невозможно дать перечень всех тех специальных вопросов, которые разрабатывались в этих сообщениях, и придется отметить только самый крупный шаг, который был сделан за последнее время французскими учеными (Ch. Henry [2], Nievenglowski [3], H. Bequerel [4]); они занялись вопросом о возбуждении X-лучей, об их источнике. В своей работе Рентген доказывает, что флуоресцирующая часть круксовой трубки испускает X-лучи, но что именно является непосредственною причиной их возбуждения, флуоресценция стекла или возбуждающие ее электрические разряды, оставалось открытым. Чтобы решить этот вопрос, названные ученые поставили исследование: может ли флуоресцирующее тело, возбужденное, помимо электрических разрядов, например, действием солнечного света, сделаться источником X-лучей? Опыты, предпринятые ими, показали, что ряд флуоресцирующих тел обладают этим свойством и, флуоресцируя [1], испускают еще лучи, которые проходят через металлы и действуют на фотографическую пластинку. Эти опыты блистательно доказывают нам, что X-лучи не связаны с электрическими разрядами (катодными лучами) и исключают возможность объяснить их какими-нибудь особыми электрическими процессами [5]. Но что же представляют собой X-лучи? Могут ли они быть причислены к какому-нибудь уже известному классу явлений или представляют совершенно новую, особенную группу?

При первом же появлении известия об открытии Рентгена были высказаны самые разнообразные и противоречивые догадки о физической природе нового явления. Из всех этих догадок предположение, что X-лучи суть не что иное, как колебания, сходные со световыми и разнящиеся от них лишь быстротою, видимо, начинает находить все более и более подтверждений в новейших исследованиях. Такое предположение является по существу легко допустимым: так, мы знаем, что все цвета, различаемые нашими глазами в спектре белого света, ничем друг от друга не отличаются, как только периодом колебаний, и что колебания красного света в два раза медленнее колебаний фиолетового. Особыми приборами мы могли исследовать спектр в невидимой для глаза части, по ту сторону красного цвета — в инфракрасном, и нашли там всевозможные колебания и в десять, и в двадцать раз более медленные; наконец, гений Герца указал нам способы возбуждать и исследовать колебания в тысячи, даже в миллионы раз более медленные, чем колебания красного света. С другой стороны, фотографическая пластинка позволяла нам исследовать невидимый спектр по ту сторону фиолетового — его ультрафиолетовую часть, где колебания

[1] Интересно, что соли урана обладают способностью и очень долго после освещения Солнцем, когда все видимые следы флуоресценции давно исчезли, непрерывно, хотя и слабо, испускать X-лучи подобно тому, как соли стронция (так называемая «светящаяся краска») долгое время светятся (флуоресцируют) в темноте.

быстрее, чем в видимом спектре; но до сих пор самые быстрые колебания, которые нам известны, лишь в четыре раза быстрее колебаний фиолетового света [6]. Предположение, что X-лучи суть лучи ультра-ультрафиолетовые, существование которых мы не только не отрицаем, но и стараемся констатировать, является поэтому вполне возможной гипотезой.

Теперь посмотрим как эта гипотеза объясняет наблюдаемые явления. Прямолинейное распространение их, а также способность возбуждать флуоресценцию экрана и действовать на фотографическую пластинку — свойства, общие с лучами света. Большая или меньшая прозрачность тел— свойство, хорошо известное и для света; значительную прозрачность металлов для ультра-ультрафиолетовых лучей нетрудно предвидеть, имея в виду, что в известном нам спектре металлы для быстрых колебаний более прозрачны, чем для медленных. Особенности при отражении — рассеяние X-лучей — объясняются тем, что политура зеркальных поверхностей, вполне достаточная для наших, сравнительно больших волн света, слишком груба для очень малых волн,— для них эти поверхности являются шероховатыми. Самое серьезное возражение, как казалось бы, заключается в том, что с увеличением быстроты колебаний, с приближением к фиолетовому концу спектра увеличивается преломляемость световых лучей в прозрачных телах; но теория света учит нас, что при дальнейшем возрастании числа колебаний в луче его преломляемость, достигнув предельной величины, падает, и для очень быстрых колебаний надо ожидать отсутствия преломления; та же теория учит, что в известных частных случаях такое отсутствие преломления может иметь место и для лучей видимого спектра, что мы действительно и наблюдаем: так, призмы из золота и фуксина не отклоняют света определенных окрасок — отсутствие преломления не является нам чем-либо необъяснимым. Целый ряд других особенностей X-лучей также без труда объясняется на основании предположения, что они суть ультра-ультрафиолетовые лучи света.

Но, во всяком случае, это лишь одно из возможных предположений, и только всестороннее внимательное исследование самого явления, как оно совершается в природе, независимо от каких-либо теорий, может раскрыть нам сущность его. Таким изучением явления занимаются теперь исследователи во всех концах мира; все эти силы направлены на то, чтобы найти те невидимые нити, которые связывают новое явление с другими, нам хорошо известными явлениями природы, выяснить нам то положение, которое оно занимает среди них и тем расширить и обогатить ту стройную картину природы, которую дает нам физика.

Значительная доля общего интереса, вызванного опытами Рентгена, обусловливается и тою легкостью, с которой каждый располагавший необходимыми аппаратами и знакомый с несложною техникой фотографа-любителя мог делать ряд, с первого взгляда удивительных, почти невероятных фотографий, снимая содержимое кошелька или запертого деревянного ящика.

Имея под рукой трубку Крукса, достаточно сильную катушку Румкорфа и несколько гальванических элементов, нетрудно скоро освоиться с техникой фотографирования: укрепив круксову трубку так, чтобы флуоресцирующее пятно находилось на три пальца от эмульсионного слоя



Рис. 3.



Рис. 4.

возможно более чувствительной фотографической пластинки, которая находится в закрытой кассете, можно положить на последнюю кошелек с несколькими монетами и затем пустить катушку в ход минут на десять, проявляя и закрепляя затем пластинку обыкновенным способом: этот первый опыт сразу покажет, как надо изменить время экспозиции, чтобы получить хорошо выдержанный негатив [1].

Полученный таким путем снимок по существу отличается от тех, которые мы получаем в камере при помощи объективов: в рентгеновой фотографии мы получаем только более или менее прозрачные силуэты снимаемых предметов, наложенные друг на друга,— мы видим «китайские тени» полупрозрачных предметов; приемы обыкновенной фотографии здесь неприменимы, так как мы не можем построить объектива для X-лучей: до сих пор, как мы уже сказали, не найдено тела, в котором бы они преломлялись. Из самого способа снимания видно, что для получения резких очертаний необходимо, чтобы излучающая поверхность, т. е. флуоресцирующее пятно на стенке трубки было по возможности мало, чего фабриканты трубок достигают тем, что придают катоду особую форму, а также чтобы

[1] Надо заметить, что круксовы трубки при употреблении быстро портятся: яркая зеленая флуоресценция стекла ослабевает и внутри до той поры темной трубки начинает светиться фиолетовым светом выделившийся со стенок воздух; такая трубка не дает X-лучей и только выкачиванием ее можно исправить.

оно было достаточно удалено от фотографической пластинки: чем больший объем имеет снимаемое тело, тем дальше приходится отставлять трубку, что влечет за собою соответственное увеличение времени экспозиции.

При рассмотрении таких фотографий-силуэтов невольно вспоминаются те первые попытки светописи, которые делал Дэви [7] в начале нашего столетия: исследуя разложение солей серебра под влиянием света, он выставлял на солнце пропитанную солями бумагу и получал на почерневшем фоне силуэты положенных на бумагу предметов. От зоркого взгляда великого ученого не ускользнуло то применение, которое могло бы получить его исследование, и он пробовал даже снимать таким образом профиль лица, но предвидеть результаты дальнейших исследований фотохимических процессов, все то, что дает и может дать нам современная фотография, Дэви, конечно, не мог так же, как не могли это и все его современники, самая пылкая фантазия, рисуя самые заманчивые картины будущего, никогда не могла охватить и ничтожной доли того, что так естественно, так просто давало человеку изучение окружающей его природы в виде элементарных следствий из тех основных законов, которые он находил в сложной гармонии явлений.

Не то ли самое свидетельствует нам и тот снимок с кисти руки, который сделал Рентген?

Исследуя прозрачность тел, Рентген поместил между трубкой и экраном свою руку и увидел, что ткани легко пропускают Х-лучи и что только кости задерживают их,—на экране ясно вырисовался скелет кисти; заменяя экран фотографической пластинкой, он мог фиксировать это изображение.

Огромное значение подобных снимков для практической медицины было причиной того, что метод Рентгена, даже в первоначальной форме, нашел себе многостороннее применение как для диагноза страданий костей, так и для определения местонахождения инородных тел (пуль, обломков игл и стекла), мало прозрачных для Х-лучей. Рассматривая такую фотографию, мы с первого же взгляда можем увидеть, где и какого рода изменения (изъязвления или перелом) имеются в кости, и тотчас же указать, где, каких размеров и в каком положении находится в тканях инородное тело [1]. Особенно важны такие указания хирургу, который нередко не имеет возможности определить заранее район костного страдания, чем в значительной степени усложняется весь ход операции; силуэт костей, полученный по способу Рентгена без всякого болезненного ощущения для пациента, дает хирургу возможность вполне точно наметить ход операции, а при извлечении инородного тела ограничиться одним разрезом, избавляя пациента от мучительного зондирования.

---

[1] В физической лаборатории Московского университета пишущему эти строки пришлось сделать ряд снимков, которые послужили проф. Л. Л. Левшину для руководства при операциях в университетской хирургической клинике.

На первых порах применение нового метода ограничивалось главным образом исследованием кистей рук и ног, ввиду того что время экспозиции (от 10 до 30 *мин*) пациенты могут выдержать без особого утомления; так как X-лучи беспрепятственно проходят через ткани, то оказалось возможным снимать кости забинтованной руки, не удаляя повязки, или ногу в сапоге, что отзывается лишь немного на резкости силуэта костей. Целый ряд усовершенствований в деталях аппаратов с целью увеличить яркость X-лучей источника позволил значительно сократить время экспозиции; так, скелет руки можно получить в несколько секунд, и уже удалось при позе в полчаса снять позвоночник взрослого человека; возможность со временем исследовать все части человеческого скелета указанным способом не подлежит сомнению.

Пользуясь небольшими средствами, мы теперь можем снять полный скелет лишь небольших животных, птиц, рыб, пресмыкающихся и увидать в общих чертах те результаты, на которые мы можем рассчитывать в ближайшем будущем при снимании человека. Особенный интерес в этом отношении представляет собою фотография мыши, как теплокровного животного, походящего по своей организации на человека; прежде всего наше внимание, конечно, останавливается на ясно очерченном скелете: мы видим не только очертание всех костей, но и различаем изменение плотности вдоль кости (что хорошо видно и на снимках руки человека), и даже больше того: мы ясно видим очертание легких и сердца, а всматриваясь внимательнее, начинаем отличать и другие детали, — лучи Рентгена позволяют нам увидать внутренние органы. Все это только первые попытки применения нового метода — попытки, сделанные без определенного плана, пользуясь явлением, только что открытым и еще не изученным. Само собою разумеется, что дальнейшего прогресса в этом деле надо ожидать не от бесчисленного повторения снимков имеющимися под руками приборами, а от систематического исследования самого явления, следуя по тому пути, который указал Рентген.

Ввиду той блестящей будущности, которая, очевидно, ожидает приложение фотографии X-лучами к диагностическим целям, естественно является вопрос: следует ли больницы немедленно снабжать всеми приборами, необходимыми для снимания по способу Рентгена? Категорический ответ на такой вопрос дать, конечно, невозможно ввиду того, что каждый день получаются известия о новых и новых исследованиях и открытиях в этой области, и только что высказанная смелая догадка может иметь уже полное опровержение или блистательное подтверждение в неполученном еще номере журнала; то, что кажется невозможным сегодня, будет завтра применено, а послезавтра окажется устарелым. То, что дают небольшие катушки и обыкновенные трубки Крукса, т. е. возможность исследовать кисти рук и ног, вряд ли может получить широкое применение в ежедневном обиходе больницы, так как требует приготовления (заряжения элементов, проявления пластинок) и отнимает очень много времени на иссле-

дование тех именно случаев, которые встречаются редко и, с точки зрения врача, принадлежат к более легким по сравнению с теми, с которыми он постоянно имеет дело. В больших городах, где ежедневно представляются случаи с пользой применить метод Рентгена, где необходимый больничный комфорт налицо и врач имеет помощников, там установка подобных приборов бесспорно может оказать уже и теперь существенную пользу.

Применение X-лучей в медицине, возможность увидать то, что, казалось, останется навеки сокрыто от глаз человеческих (скелет живого человека), самое появление этого почти сказочного диагностического приема — все это с замечательною рельефностью выделяет ту часто забываемую истину, что всякий прогресс в прикладной науке или технике обусловливается исключительно успехами в области основных наук, в области чистого знания.

10. П. ЛЕЙБЕРГ[1] [1]. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Автор исследует ход возбужденной амплитуды колебаний в резонаторе при помощи манометра Вина [2] (Wied. Ann., **36**, p. 834, 1889) для случая, когда источник, возбуждающий колебания (резонансный ящик электромагнитного камертона), имеет постоянную высоту тона и интенсивность, тогда как собственные колебания резонатора изменяются вследствие изменений (ею) формы; при этом отверстие резонатора и его расстояние от источника звука остаются неизменными. Если для каждого опыта определен основной тон резонатора путем сравнения с камертоном, то на основании хода явления в непосредственной близости к резонатору можно определить по Бьеркнесу (Wied. Ann., **44**, p. 74, 1891) коэффициент затухания соответствующего резонатора; подробно ознакомиться с порядком этих вычислений можно по оригиналу.

Источником колебаний служили камертоны Ut_3(n = 256) и Sol_3 (n = = 384).

Были исследованы следующие резонаторы, изготовленные из толстого листового цинка:

a). Для цилиндрических резонаторов Гельмгольца

	№ 1	№ 2
Средний диаметр, *мм*	128	86
Диаметр отверстия, *мм* . . .	40	12,8
Переменная высота цилиндра, *мм*	100—180	70—120

При максимальном резонансе они принимают форму, мало отличающуюся от шарообразной.

b). Резонатор, построенный наподобие резонансного ящика камертона;

	№ 3
Диаметр, *мм*	49,7×98,5
Переменная длина, *мм* . .	210—400

---

[1] П. Лейберг. ЖРФХО, отд. физ., **27**, стр. 93, 1896.

Эти три резонатора в среднем положении резонировали с Ut_3.

c) Кроме того, были исследованы еще четыре цилиндрических трубочных резонатора (с острыми краями), которые давали резонанс как с Ut_3, так и с Sol_3.

	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Диаметр, *мм*	162	83	43	23
Переменная длина, *мм* . .		{ 150—290 250—390		200—350 320—470

Другие насадки давали возможность исследовать для № 2 Sol_3 как третий гармонический обертон при переменной длине 448—885 *мм* и Sol_3 как пятый, а Ut_3 как третий гармонический обертон при переменной длине 767—1200 *мм*.

Наблюдения, проведенные с различными манометрами (мембранами из бумаги, резины и коллодия), дали согласные между собою результаты. Для вычисления логарифмического декремента γ был определен промежуток, за который возбуждение амплитуды падает до половины максимального значения; отдельные ряды наблюдений пояснены таблицами и чертежами.

Наблюдения даны для трубки № 2 при различных гармонических обертонах для γ:

	Sol_3	Ut_3
В качестве основного тона	0,151	0,0918
В качестве 3-го гармонич. обертона . . .	0,0558	0,0357
В качестве 5-го гармонич. обертона . . .	0,0348	—

Автор указывает на то, что трубку, колеблющуюся с одним из основных тонов, можно рассматривать как нечетное число $1/4\ \lambda$ резонаторов, из которых лишь один может излучать энергию: логарифмический декремент такой системы должен убывать с увеличением числа резонаторов, не испытывающих затухания. Эти опыты доказывают, что затухание колебания внутри резонатора лишь весьма незначительно.

Для приведенных выше резонаторов были найдены следующие значения γ:

	Sol_3	Ut_3
№ 1	0,299	0,107
№ 2	0,151	0,092
№ 3	0,0735	0,097
№ 4	0,164	0,243

Диаметру 40—60 *мм* отвечает минимум затухания.

Еще меньший декремент дал резонатор III: $\gamma = 0,0626$.

Для цилиндрических резонаторов Гельмгольца I и II декременты, полученные из наблюдений, были сопоставлены с вычисленными; они были определены Рэлеем («Theorie des Schalles») из рассмотрения акустического

излучения отверстия и Колачеком (Wied. Ann., 12, p. 353, 1881) на основании исследований тепловых явлений внутри резонатора.

	Наблюденные	Вычисленные	
		Рэлей	Колачек
I	0,0977	0,0943	0,0038
II	0,318	0,0312	0,0057

Совпадение двух первых чисел автор считает случайным; на незначительность затухания внутри резонатора было уже указано выше.

Несложное рассуждение показывает, что даже при наибольшем из всех наблюдаемых декрементов отклонение собственного тона резонатора от тона при его максимальном резонансе должно лежать на пределе разности, которая еще может быть обнаружена.

В прибавлении описываются опыты с трубкой № 2, при которых отверстие резонатора выходило в плоскую стенку (пробковый диск в 71 *см* диаметром). Оказалось, что при этом логарифмический декремент возрастает, а именно для Sol_3 на 12%, а для Ut_3 — на 8%.

11. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ А. Г. СТОЛЕТОВА[1]

В экспериментальных работах покойного Александра Григорьевича так же, как и во всем, что он делал, сказались его индивидуальные особенности; глубокое понимание тех запросов, которые ставила наука в данный момент, связанное с замечательной ясностью мышления, приводили его к задачам вполне определенным, раз взявшись за которые он не отступал ни перед какими трудностями. Значение его работ всего яснее характеризуется тем, что они стали точками отправления других исследователей. Цель настоящего очерка заключается в том, чтобы напомнить основные черты этих экспериментальных работ, показать вам приборы, которыми пользовался покойный исследователь, и демонстрировать те опыты по актиноэлектричеству, которые возможно показать большой аудитории.

Первою экспериментальною работой Столетова была его докторская диссертация: «О функции намагничения железа», — вопрос, который в начале семидесятых годов находился в области смутных предположений и не поддавался простой экспериментальной обработке. А. Г. воспользовался для решения этой задачи методом замкнутого кольца, только что предложенным Кирхгофом; он так описывает этот метод:

«Представим себе железное кольцо, точнее говоря, тело вращения, у которого ось вращения проходит вне массы. Положим, что это кольцо по всей своей периферии обвито проволокой (главной проволокой) в виде тесно один к другому прилегающих оборотов, из коих каждый можно

[1] Речь, произнесенная в соединенном заседании Об-ва любителей естествознания, антропологии и этнографии и его Отделения физических наук, посвященном памяти А. Г. Столетова, 15 ноября 1896 г. В день заседания в большой аудитории Политехнического музея была устроена выставка всех приборов, сохранившихся в физическом кабинете Московского университета от работ Александра Григорьевича по намагничиванию железа, определению скорости и актиноэлектрическим исследованиям; выставка была украшена большим портретом А. Г., принадлежащим Физическому отделу музея. В течение речи приборы были демонстрированы и при содействии сотрудника А. Г. И. Ф. Усагина [1] показан ряд опытов с актиноэлектрическими токами.

считать замкнутым плоским контуром, перпендикулярным к осевой или центральной линии кольца. Концы главной проволоки, сходящиеся в одной точке, пусть будут соединены с полюсами гальванической цепи. Сквозь такой сомкнутый, железом наполненный соленоид перекинем в один или несколько оборотов или петель другую проволоку (назовем ее вторичною) и замкнем ее посредством гальванометра.

Каждый раз, как мы замыкаем цепь в главной проволоке, гальванометр введенный во вторичную, обнаруживает присутствие мгновенного тока. Этот ток есть результат двоякого наведения во вторичной проволоке; 1) прямого гальванического наведения (Volta-Induction) вследствие появления тока в главной проволоке; 2) магнитного наведения (Magneto-Induction) через посредство железного кольца, которое, намагничиваясь от действия главного тока, тем самым наводит ток в близлежащем замкнутом проводнике. Оба наведения действуют в одном и том же направлении; но второе, т. е. магнитное, вообще говоря, гораздо сильнее, чем прямое.

При размыкании цепи исчезновение тока и возбужденного им магнетизма железной массы наводит во вторичной проволоке ток, противоположный первому».

Величину намагничивающей силы в таком замкнутом соленоиде легко вычислить, как показал Кирхгоф, если знать силу первичного тока, размеры соленоида и число оборотов проволоки в нем; отклонение гальванометра, введенного во вторичную цепь, прямо измеряет соответствующее намагничение железного кольца. Если бы взять вместо железного кольца, например, деревянное или мраморное, то гальванометр во вторичной цепи показал бы намагничивание, прямо пропорциональное намагничивающей силе, и, следовательно, коэффициент K, связывающий эти две величины, был бы величиной постоянной, не зависящей от величины намагничивающей силы R [2]. Для железа этот коэффициент непостоянен; он зависит от намагничивающей силы, он представляет собою некоторую функцию намагничения железа; $k = F(R)$

От этой работы в нашем физическом кабинете осталось лишь самое кольцо; все измерения были проведены в Гейдельберге приборами физической лаборатории Кирхгофа, так как в те времена не только лаборатории, но и простейших измерительных приборов не существовало в Московском университете.

Опытное определение функции намагничения железа и было результатом работы А. Г.: он установил, что указанный выше коэффициент с увеличением намагничивающей силы сначала очень быстро растет, достигает максимума и с дальнейшим возрастанием намагничивающей силы начинает постепенно убывать. Вот как оканчивает он свою работу:

«Методами, изложенными здесь, или им подобными, надлежало бы исследовать функцию намагничения у различных сортов железа, проследить зависимость ее от температуры, от повторения намагничений и т. д. Вопрос, как мне кажется, имеет достаточную важность. С одной стороны,

изучение его может внести свет в наши догадки о сущности того молекулярного процесса, который мы называем магнитным состоянием тел. Уже теперь, на основании здесь изложенных данных, можно сказать, что гипотеза о вращении молекулярных магнитов железа в той форме, как она развита у Вебера [3], не подтверждается опытом: восходящее течение K при слабых намагничивающих силах противоречит этой гипотезе.

С другой стороны, изучение функции намагничения железа может иметь практическую важность при устройстве и употреблении как электромагнитных двигателей, так и тех магнитно-электрических машин нового рода, в которых временное намагничение железа играет главную роль (снаряды Вильде [4], Сименса [5], Ладда [6] и др.). Знание свойств железа относительно временного намагничения так же необходимо здесь, как необходимо знакомство со свойствами пара для теории паровых машин. Только при таком знании мы получим возможность обсудить a priori наивыгоднейшую конструкцию подобного снаряда и наперед рассчитать его полезное действие».

Такое заключение теперь нам кажется простым и естественным, так как мы знаем, что указанным методом действительно воспользовались впоследствии многие ученые, но нам трудно представить себе все значение приведенных слов, если мы увидим, что они помечены: «Москва, 8 марта 1872 г.», когда еще не было и намека на современную электротехнику: только тогда мы сможем оценить замечательную проницательность молодого физика.

Другой работой А. Г., в которой с особенной яркостью выступает его несокрушимая энергия, было сделанное им определение «критической скорости v». Еще работая над исследованием функции намагничения железа, он составил себе план этой новой работы и заказал необходимые приборы, но только десять лет спустя опубликовал полученные им предварительные результаты; трудно поверить, чтобы ученый задался подобной, очень сложной работой тогда, когда в нашем университете не было даже элементарных удобств для работы — наша физическая лаборатория, как не раз говаривал покойный, постепенно выросла из его определения v.

Вот как он сам говорит об этом исследовании:

«Предметом настоящей работы служит точное определение отношения между электромагнитными и электростатическими единицами той скорости (v Максвелла), которая была бы скоростью распространения электромагнитных возмущений в пустоте (или в воздухе) и которая, по всей вероятности, не отличается от скорости распространения света в той же среде».

Чтобы не утомлять вашего внимания сложным разбором этих единиц, я позволил себе для уяснения основной мысли подобного исследования обратиться к другому, более простому случаю измерения данной величины двумя разнородными единицами; так, расстояние между двумя деревнями мы можем измерить двумя способами: или непосредственно в

единицах длины (и тогда единицею меры будет 1 *км*), или указывая время, необходимое для прохождения всего пути (в часах). Соотношение между этими двумя разнородными единицами будет (предполагаемая постоянною) скорость путника, и ее мы можем определить, измеряя какое-нибудь произвольное расстояние указанными двумя способами.

Вот что говорит А. Г. о предпринятом им определении:

«Между различными методами, которые употреблялись для определения величины v, есть одна, которая, на мой взгляд, способна дать результаты весьма точные: это метода абсолютного конденсатора, т. е. конденсатора, емкость которого в воздухе (или пустоте) может быть точно вычислена на основании его формы и размеров. Конденсатор о двух плоских параллельных пластинках, снабженных, по Томсону, защитительным кольцом (guard-ring), удовлетворяет этому требованию. Строгая теория этого приспособления была дана несколько лет тому назад профессором Кирхгофом.

Конденсатор заряжают с помощью одного гальванического элемента и сравнивают его разрядный ток с постоянным током, производимым тем же элементом в цепи, сопротивление которой дано.

Вместо того чтобы измерять один разряд с помощью баллистического гальванометра, как то делали Айртон [7] и Перри [8], я пропускаю через обыкновенный гальванометр Томсона ряд разрядов, приблизительно сто в секунду, которые действуют на стрелку, как постоянный ток. Этот результат получается с помощью коммутатора или вращающегося распределителя».

Таким образом, искомое соотношение получается, с одной стороны, из определения емкости конденсатора в электростатических единицах с помощью тщательного обмера его линейных размеров, а с другой,— из сравнения эквивалентного по сопротивлению проводника с нормальной единицей сопротивления (*ом*), определенной в электромагнитных единицах.

Мы расположили все приборы по схеме, предложенной Столетовым, и могли бы приступить к определению критической скорости указанным путем, если бы необходимое регулирование конденсатора и его обмер не требовали весьма сложных операций, доступных только очень опытному и настойчивому наблюдателю в тиши лаборатории.

Заканчивая свою работу, А. Г. говорит:

«Мои опыты дали результат, весьма близкий к результату, полученному сперва Айртоном и Перри и позднее Шида [9] (от 298 000 до 300 000 *км/сек*).

Мои приборы, каковы они в настоящую минуту или каковыми они будут в ближайшем будущем, далеки от совершенства, но продолжительное изучение вопроса показало лишь всю пригодность метода. Я уверен, что ряд опытов, произведенных по тому плану, который я только что изложил, но с перворазрядными приборами, может дать величину v до четвертого десятичного знака. Вот почему мне хочется увидеть мою

программу выполненной в цикле работ, связанных с работами Интернациональной комиссии Ома».

Впоследствии многие ученые пользовались указанным методом, и точнейшими определениями v мы обязаны ему. Те трудности, на которые А. Г. шел, взявшись за подобную работу, указывают на огромный интерес, который возбуждало в нем это таинственное равенство v со скоростью света,— интерес, который заставил его создать физическую лабораторию, приспособленную для научных работ. С этой точки зрения все то, что было связано с его работою и что не вошло в его статью, составило эпоху в преподавании физики в Московском университете и в этом отношении поставило его примером для других русских университетов.

Последние годы А. Г. особенно сильно интересовал тот отдел физики, который в настоящее время представляет собою область разрозненных фактов, связь между которыми, несмотря на все старания, еще не удалось установить; это область электрических разрядов в газах. Связь между подобными газовыми разрядами и светом в особенности привлекала его внимание; вот что он говорит в своих «Актиноэлектрических исследованиях».

«Повторяя в начале 1888 г. интересные опыты гг. Герца, Э. Видемана [10], Эберта [11] и Гальвакса [10] относительно действия лучей на электрические разряды высокого напряжения, я вздумал испытать, получится ли подобное действие при электричестве низких потенциалов.

Два металлические диска («арматуры», «электроды») в 22 *см* диаметра были установлены вертикально и друг другу параллельно перед электрическим фонарем Дюбоска, из которого вынуты все стекла. В фонаре имелась лампа с вольтовой дугой. Один из дисков, ближайший к фонарю, сделан из тонкой металлической сетки, которая была натянута в круглом кольце, другой диск — сплошной (металлическая пластинка).

Диски соединены между собой проволокой, в которую введены гальваническая батарея и чувствительный астатический гальванометр Томсона.

Благодаря свойству передней, сетчатой арматуры задняя арматура могла быть освещаема лучами вольтовой дуги с внутренней стороны, т. е. с той, где преимущественно накопляется электрический заряд. Другая арматура (сетка) освещалась лишь с невыгодной (слабо заряженной) стороны прямыми лучами, с внутренней же стороны — лишь отраженными от сплошного диска. Такая комбинация казалась мне наиболее удобной, чтобы обнаружить разряжающее действие лучей, что и оправдалось вполне. Этот «сетчатый конденсатор» составляет главную и существенную принадлежность почти всех опытов.

Я назвал пару дисков конденсатором. Мы можем, с другой стороны, назвать их парою электродов, погруженных в воздух, которые при известных условиях освещения должны были обнаружить действительную или кажущуюся электропроводность — пропускать электрический ток, как бы замыкая собою «цепь» (разорванную этим воздушным слоем, пока нет лучей)».

Пользуясь указанным методом, А. Г. мог вполне строго доказать, что разряжается под действием света только отрицательный заряд; он установил связь между поглощением света телами и чувствительностью их поверхности к актиноэлектрическим явлениям, показал, что актиноэлектрический ток устанавливается (практически) мгновенно с освещением (запаздывание тока не превышает 1/1000 *сек*), исследовал законы электрического сопротивления воздуха и установил отсутствие поляризации под актиноэлектрическим током. Очень изящно иллюстрировал он основные добытые результаты, построив «воздушный элемент»; вот как А. Г. его описывает:

«Чтобы получить ток без батареи, нужно сделать сетку из металла, более электроположительного, чем диск. Желая воспользоваться для сетки цинком и ввиду трудности цинкования латунной сетки, я употребил вместо сетки диск из Zn, продырявленный частыми круглыми отверстиями; другой диск (отрицательная арматура) — из серебрянной латуни (Ag). Соединяя их проволокой через гальванометр без всякой батареи, я действительно получал заметный ток всякий раз, когда конденсатор был освещен вольтовой дугою. Система Zn, Ag и воздух при условии освещения Ag активными лучами временно обращается в настоящий гальванический элемент, где роль жидкости играет газовая среда».

Разбирая добытые им результаты, сопоставляя их с работами других ученых, А. Г. такими замечательными словами заканчивает свой труд:

«Как бы ни пришлось окончательно сформулировать «объяснение актиноэлектрических разрядов, нельзя не признать своеобразной аналогии между этими явлениями и давно знакомыми, но до сих пор непонятными разрядами гейслеровых [12] и круксовых [13] трубок. Желая при моих первых опытах ориентироваться среди явлений, представляемых моим сетчатым конденсатором, я невольно говорил себе (понимая всю странность этих слов), что передо мной гейслерова трубка, могущая действовать и без разряжения воздуха; трубка не с собственным, а с посторонним светом. Там и здесь явления электрические тесно связаны со световыми, там и здесь катод играет особенную роль и, по-видимому, распыляется. Изучение актиноэлектрических разрядов обещает пролить свет на процессы распространения электричества в газах вообще».

Открывая нам этими последними словами причину той сложности электрических процессов, которая нас поражает при светящихся газовых разрядах, он указывает наиболее простой путь исследования их. В настоящее время, когда этот вопрос еще только начал разрабатываться, трудно предвидеть тот путь, по которому пойдут исследователи; но вряд ли кто из них оставит без внимания указанное замечание.

Говоря о значении работ А. Г., мы видели, что ему на долю выпало глубокое нравственное удовлетворение: его мысли с течением времени, изменяясь по форме, развивались все шире и шире, приобретали значение, о котором, может быть, он и не решался мечтать; так. его работы по намаг-

ничиванию нашли продолжение во всестороннем исследовании этих таинственных магнитных свойств для целей практики при построении динамо машины. В его работе по определению критической скорости v сказывается стремление в точном измерении величины найти строгое экспериментальное доказательство указанной Максвеллом связи между электрическими и световыми явлениями; впоследствии опыты Герца блистательно дали ответ на интересовавшие его вопросы. Наконец, последние его работы по актиноэлектричеству не были напрасными попытками; занимавшие его вопросы разрабатываются теперь с большей энергией, чем когда-либо.

Всегда чуткий ко всему новому и значительному в науке, А. Г. сохранил этот интерес к занимавшим его научным вопросам до последних часов своей жизни. Судьба судила мне часто видеть его в последние дни его болезни. Несмотря на все увеличивающуюся слабость, мысль его продолжала работать с особенной свойственной ему ясностью, речь отличалась обычной тонкостью и изяществом, и он, как бы предчувствуя близкую кончину, точно торопился высказать все то, что ему было дорого, и с особенной охотой делал как бы обзоры современного состояния наших знаний и указывал возможность их дальнейшего развития или беседовал о нуждах нашей лаборатории.

Последний раз я его видел за день перед кончиною; он был настолько слаб, что попытался, но уже не мог протянуть мне руки — воспаление распространилось на левое легкое, и силы изменили ему; тем не менее он заставил меня рассказать о моих занятиях за последний день и навел разговор на свою любимую тему о газовых разрядах. Он сам говорил мало, но потом оживился и слабым, чуть слышным голосом, с большими перерывами стал говорить о значении подобных исследований. Прощаясь со мною, он слабо пожал мне руку и чуть слышно добавил: «Советую заняться этими вопросами — они очень интересны и очень важны». Это были последние слова, которые я от него слышал.

Через день А. Г. тихо скончался.

Ключ к уразумению этой замечательной, светлой личности мы находим в словах Гельмгольца (перевод сделан А. Г.).

«Перед научным деятелем выступает вся совокупная мысль цивилизованного человечества как одно живущее и развивающееся целое, чья жизнь представляется вечностью в сравнении с коротким жизненным сроком каждого отдельного лица. Он видит себя, со своими скромными трудами на пользу науки, поставленным на служение вечному и святому делу, к которому привязан узами любви. Собственная работа освещается для него этим сознанием. Теоретически понять это сумеет, быть может, всякий; но чтоб это понимание развилось до степени нравственного чувства, нужен собственный опыт». И кто, кроме истинного ученого, не только понимающего, но всем существом своим любящего науку, в последние часы тяжелого страдания будет заботиться об ней и с верою скажет о вопросах чистого знания: «Они очень интересны и очень важны».

12. ПРОЛОЖЕНИЕ С ОБОРОТНОЙ ПРИЗМОЙ

(Посвящается Ивану Филипповичу Усагину)

Приемам прокладывания на экран явлений, как например капиллярных, критического состояния, электролиза воды и т. д., недоступных непосредственному наблюдению в большой аудитории, уделяют слишком мало внимания.

Как то ни странно, но, к сожалению, нередко довольствуются повернутым на экране изображением: мне не раз приходилось слышать жалобы слушателей, совершенно терявшихся в виденной картине [1], и я, со своей стороны, предпочитаю совершенно не показывать опыта на экране, чем преподносить его слушателям в таком извращенном виде и требовать от них не только внимания, но и сверхсильного (притом нелепого) напряжения фантазии; слова лектора, что «на экране все в обратном виде», так и остаются словами, а повернутый на экране стакан с невыливающейся водой, т. е. извращение хорошо известного слушателю явления, невольно привлекает его естественную наблюдательность больше, чем рассказ о том новом явлении, которое он, видя на экране, должен непременно про себя извратить, чтобы понять.

Указанный недостаток давно уже устранен оборотною призмою Беккереля [1] и вряд ли найдется кабинет, в котором при фонаре Дюбоска не было бы этой призмы [2]; ее, однако, нередко оставляют без употребления, ссылаясь на то, что она пропускает мало света и дает несколько смытое изображение (благодаря плохому стеклу). Оба эти возражения, по-моему, все-таки не дают еще права показывать обращенные изображения; в настоя-

---

[1] Не могу не вспомнить характерной фразы из одного, в общем, хорошего и толкового газетного отчета: «... и выделявшийся водород густыми каплями падал на дно сосуда»,— фразы, отлично характеризующей педагогическое значение подобных демонстраций.

[2] Обращаю внимание на обстоятельную статью: B. Wanach [2]. Theorie des Reversionsprismas. Ztschr. f. Instrk, 19, p. 161, 1899.

щее время при пользовании сильным электрическим светом (12—20 *а*) и оборотной призмой из хорошего оптического стекла оба возражения теряют всякое основание. Так, например, физический кабинет Московского университета располагает в настоящее время превосходною оборотною призмою от Шмидта и Генша из Берлина (цена 120 марок; штатив к ней — 24 марки), которая в связи с антипланатом (Gruppen Antiplanat) Штейнгеля (цена 105 марок) дает светосильные, вполне резкие изображения. При проекции диапозитивов можно без всякого ущерба оставлять оборотную призму; последнее обстоятельство позволяет раз навсегда соединить пролагатель с призмой на одном штативе. Небольшое наклонение призмы позволяет удобно повышать или понижать изображение на экране, не трогая приборов; это значительно облегчает установку.

При том числе демонстраций, в которых пользуются проложением на экран, указанные расходы на хороший пролагатель с оборотной призмой, конечно, не могут служить сколько-нибудь серьезным препятствием.

Говоря о проложении на экран, я позволю себе сделать попутно еще два замечания: во-первых, относительно расположения приборов, а во-вторых, относительно увеличения, допустимого на экране.

Проектирование из прохода между лавками, перпендикулярно к стене за кафедрою, очень неудобно, и потому на западе теперь в большинстве случаев оставлено; при указанном способе бесспорно получается наивыгоднейшее условие для картины на экране, но зато самый прибор и производимые с ним манипуляции не видны всем сидящим за фонарем или видны в искаженном ракурсе (в оптических приборах только наружные края диафрагм), а сбоку заслонены экспериментатором: слушатель видит на экране только результаты, полученные невидимыми для него приспособлениями и приемами. При проектировании вдоль кафедры приходится экран ставить в конце кафедры несколько наклонно к оптической оси приборов; картина несколько портится, но зато расположение опыта вблизи фонаря видно во всей аудитории,и за всяким движением экспериментатора легко следить: экран является не полем наблюдения, а лишь подспорьем, чем он и должен быть.

Что касается до увеличения, то напрасно стремятся получить возможно большое изображение на экране. Помимо того, что в этом случае свет слабее и части прибора, находящиеся не строго в одном плане, благодаря короткофокусному пролагателю размыты [1], слушатель не может дать себе ясного представления о действительно совершающемся явлении, теряя за колоссальными размерами картины масштаб для действительной природы. Основанием для расчета увеличения может служить такое соображение: для наблюдателя, находящегося на расстоянии двух метров,

---

[1] Неудобство пролагать цилиндрические и шаровые прозрачные тела, которые сами действуют как линзы, можно обойти только, помещая их в сосуды с плоскими стенками и наполняя последние водой, что в огромном большинстве встречающихся случаев возможно.

совершенно достаточно непосредственного наблюдения; поэтому в аудиториях, где расстояния до экрана не превышают тридцати метров, десяти- или пятнадцатикратного увеличения во всех случаях совершенно достаточно[1], особенно если еще иметь в виду, сколько деталей приборов демонстрируется без стеснения всей аудитории непосредственно.

Малое увеличение имеет еще и то огромное преимущество, что позволяет делать демонстрацию на экране без затемнения аудитории; во всех случаях я считаю необходимым уменьшать свет в аудитории лишь настолько, чтобы изображение на экране было сносно видно; той яркости и эффектности картины, которая всегда получается в темной аудитории, следует самым старательным образом избегать, чтобы этим не отвлекать внимания слушателя от приборов и манипуляций, на которых он должен сосредоточивать свое внимание.

Указанные соображения мною приведены так подробно ввиду огромного значения демонстраций на экране в больших аудиториях как неизбежного подспорья при наблюдении явлений — подспорья, которым надо пользоваться очень осторожно, чтобы не дать картинке на экране останавливать на себе внимание больше, чем явлению на аудиторном столе, и чтобы демонстрацию при помощи экрана не превратить в представление на экране.

Москва. Январь 1900.

---

[1] Само собою разумеется, что в некоторых немногих случаях полезнее брать большое увеличение, до микроскопических объективов включительно.



13. ЖАР ВОЛЬТОВОЙ ДУГИ

Удалив конденсор и заменив его тонкой стеклянной пластинкой (стеклом от негатива) для того, чтобы защитить пролагатель от разрушительного действия дуги, получают при помощи пролагателя и оборотной призмы прямое изображение дуги на экране; угли поставлены вертикально, нижний уголь положительный. На экране показывают возгорание, образование кратера и потухание дуги (20 *а*). Отколотый клинообразно и зажатый в тигельные щипцы кусок огнеупорного кирпича подносят сзади к дуге, предварительно заперев регулирующий механизм; на экране ясно видно приближение освещенного куска, его плавление и кипение. Для второй демонстрации образуют вертикальный кратер или, что быстрее, вставляют новый положительный уголь с высверленной чашкою; образуют дугу, запирают механизм и подносят в щипцах железный гвоздь или проволоку; сплавившаяся часть дает в кратере сильно выступающую светящуюся каплю, по поверхности которой бегает длинная дуга, заставляя ее кипеть.

Москва. 1900.

14. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР[1]

Стремление получать более или менее высокие температуры для обогревания, приготовления пищи и искусственного освещения мы встречаем при первых шагах культурного развития человека: сказание о подвиге Прометея[2], научившего людей пользоваться огнем и тем освободившего их от безропотной покорности слепым силам природы, в поэтической форме передает то, чему учит современная антропология, считающая уменье пользоваться огнем первым культурным шагом первобытного человека; дальнейшее усовершенствование в приемах пользования огнем, необходимое для выплавки руд, сопровождалось колоссальным шагом вперед, переходом от «каменного» века к «бронзовому».

За те тысячелетия, которые протекали с начала бронзового века до начала истекающего столетия, технический прогресс в приемах получения тепла ограничивался употреблением горения твердого топлива (дерева, каменного угля, торфа) и в редких случаях жидких веществ (растительных масел). Совершенно новая эра, еще более отличная от предыдущей, чем бронзовый век от каменного, начинается вместе с развитием естествознания, благодаря заботливому, систематическому изучению явлений природы; здесь первые шаги современной химии сопровождались переворотом всего миросозерцания человека, и объяснение горения как реакции окисления, которое установил Лавуазье, впервые вывело вопрос о получении высоких температур на научную почву. С другой стороны, развитие учения об электричестве, практические приложения которого создали современную электротехнику, в свою очередь, дало нам в руки ряд весьма удобных приемов получать высокие температуры. Ознакомимся теперь

[1] По конспекту публичной лекции, читанной 4 ноября 1899 г. в физической аудитории Московского университета.

[2] Сказания, очень близкие по характеру к греческому мифу, мы находим в еще более ранние периоды у народов Ассирии и Индии.

с наиболее часто употребляемыми способами и приборами, назначенными для получения высоких температур.

Рассмотрим сперва тепловые процессы, сопровождающие химическую реакцию окисления: сгорая в кислороде, каждый грамм данного вещества выделяет совершенно определенное количество тепла [1]; если мы будем проводить наши опыты при наивыгоднейших условиях — в замкнутой оболочке, совершенно не пропускающей тепла,— то вся выделившаяся теплота потратится на нагревание полученных продуктов горения; подводя новые порции кислорода и горючего материала, мы не можем достигнуть более высокой температуры, так как вся вновь выделяющаяся теплота потратится на нагревание вновь образовавшихся продуктов сгорания до той температуры, которой мы уже достигли раньше. Дальнейшее повышение температуры можно, впрочем, получить, если как горючий материал, так и необходимый для сжигания кислород предварительно нагревать до возможно высокой температуры. Этот прием, казалось бы, открывает возможность достигнуть любой температуры, если воспользоваться полученною более высокою температурою снова для подогревания продуктов горения, долженствующих дать еще более высшую температуру и т. д.; здесь, однако, приходится сталкиваться с новыми явлениями: при очень высоких температурах химическое сродство кислорода и сжигаемого материала начинает делаться все меньше и меньше, количество тепла, выделяемого каждым граммом вещества, все убывает, сгорание делается неполным, а если каким-либо другими источниками тепла и удается достигнуть еще более высокой температуры, то реакция окисления прекращается или даже идет в обратном порядке — продукты реакции распадаются на свои составные части, они диссоциируют; таким образом, температура, близкая к температуре диссоциации продуктов горения, есть наивысшая температура, которую мы можем получить, пользуясь химической реакцией. На пути к достижению этих теоретически возможных наивысших температур встречаются, однако, большие затруднения: так, вводя нагреваемый предмет в свободное пламя, мы не можем нагреть его до температуры пламени: огромное количество тепла теряется излучением раскаленной поверхности в окружающее пространство. До значительно более высокой температуры мы можем нагреть тело, окружая его стенками печи, раскаляемыми тем же пламенем; но и в этом случае еще весьма большое количество тепла беспрерывно уводится стенками печи и передается воздуху, окружающему печь.

Если мы, несмотря на эту беспрерывную непроизводительную потерю тепла, хотим достичь возможно более высоких температур, необходимо поставить процесс окисления так, чтобы в данном объеме возможно боль-

---

[1] Количество граммкалорий, выделяемое при сгорании одного грамма вещества, приблизительно таково: уголь — 8000, дерево — 4000, нефть — 11 000, водород — 34 000, светильный газ — 5500.

шее количество материала успевало окислиться в единицу времени, чтобы горение происходило возможно более энергично. Весьма важным фактором при выборе материалов и приемов является вопрос о стоимости эксплуатации; поэтому в последующем я ограничусь рассмотрением лишь тех способов, которые уже нашли обширное применение в лабораторной или технической практике.

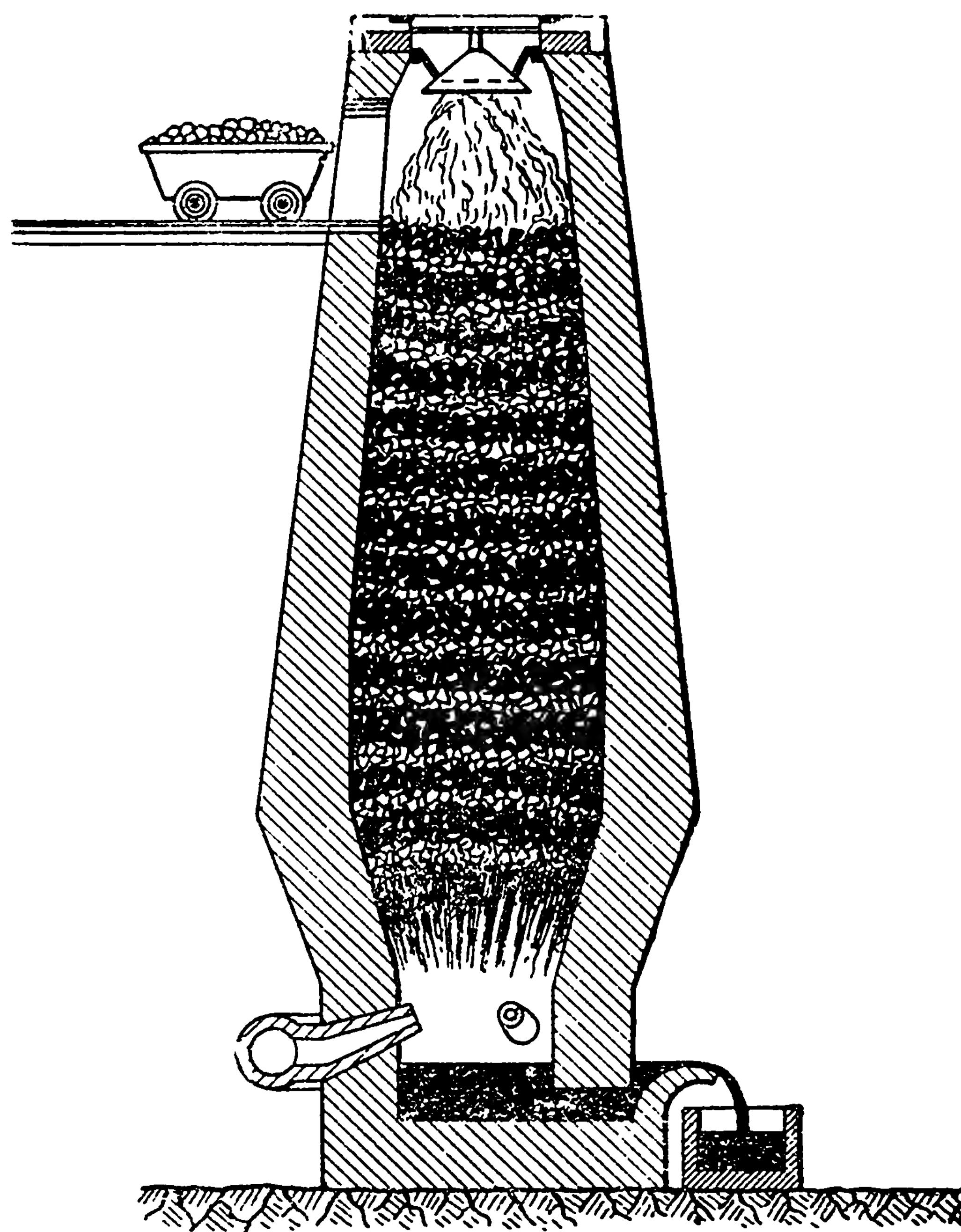


Рис. 1.

Одним из наиболее известных примеров печи, в которой получается высокая температура,— это доменная печь, служащая для выплавки чугуна из руды: цилиндрическую башню (рис. 1), сложенную из огнеупорного кирпича[1], наполняют попеременно слоями топлива (каменного или древесного угля) и слоями руды, затем внизу зажигают уголь; чтобы обеспечить быстрое сгорание, по трубе нагнетают воздух при помощи паровой воздуходувной машины. При той высокой температуре, которая развивает-

[1] Обычные размеры подобной печи: 15 *м* высоты при 4 *м* внутреннего диаметра.

ся в доменной печи (1400—1500°), происходит интересная реакция: руда, представляющая собою окислы железа, раскисляется, так как при этой высокой температуре химическое сродство между железом и кислородом меньше, чем между углем и кислородом; кислород переходит от железа к углю, и освобожденное железо, жидкое при этой высокой температуре, стекает в нижнюю часть печи и оттуда поступает в приготовленные формы[1]; выплавка идет беспрерывно, достигая в сутки до 60—90 тыс. *кг* чугуна; содержимое печи постепенно оседает и постоянно пополняется новыми запасами угля и руды, которые подвозятся вагонетками к верхней части печи. Заметим здесь, что тот же прием раскисления оказывается неприложимым для получения металлического алюминия из глины: приходится прибегать к электрической печи для получения достаточно высокой температуры.

Не только уголь, но и жидкое топливо — нефть — может служить для получения высоких температур; обычный способ сжигать нефть (керосин) при помощи фитиля, как им пользуются для освещения, непригоден для этой цели: испаряясь от нагревания горящим над фитилем пламенем, столб образующегося керосинового пара только своею наружной поверхностью соприкасается с окружающим воздухом и горит здесь в виде синего, несветящего, очень теплого пламени: развиваемое тепло настолько нагревает не соприкасающийся с воздухом пар углеводородов, что он химически разлагается (диссоциирует), причем выделившийся уголь раскаливается и дает светящую часть пламени, чтобы потом, подымаясь выше, сгореть в окружающем его воздухе.

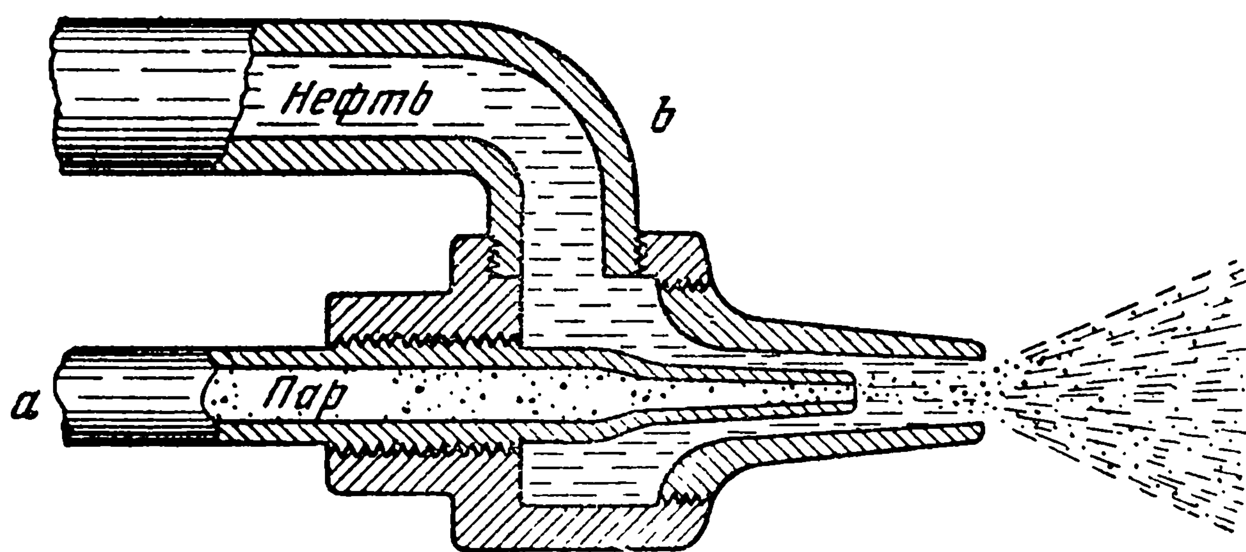


Рис. 2.

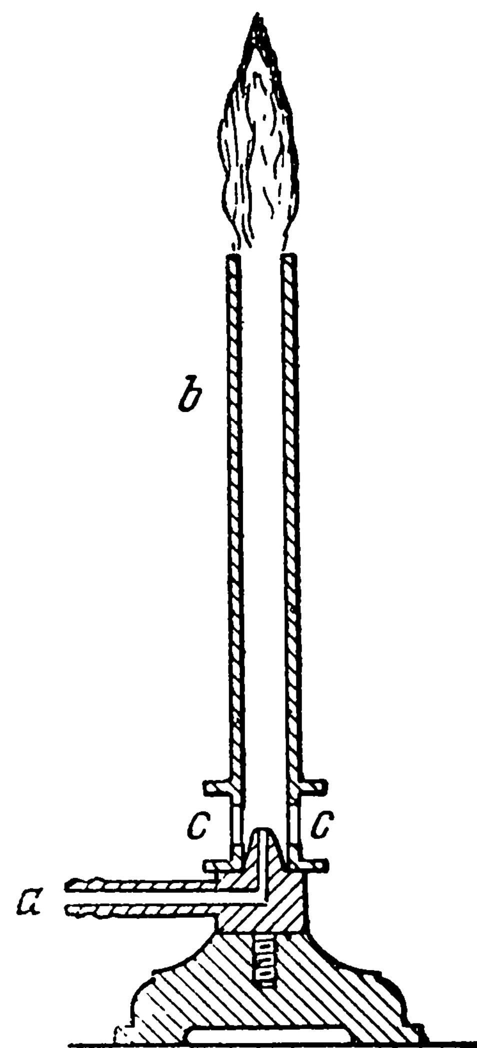


Рис. 3.

[1] Надо заметить, что жидкое железо растворяет в себе уголь (3—4%), почему получаемый при выплавке продукт — не чистое железо, а чугун; для удаления растворенного в нем углерода и получения стали или чистого железа чугун подвергают дальнейшей обработке.

Для получения более высокой температуры необходимо ускорить сгорание: это достигается тем, что нефть предварительно распыляется, и затем эта пыль зажигается: каждая пылинка со всех сторон окружена воздухом, содержащим необходимый кислород; благодаря этому сгорание происходит весьма быстро и температура соответственно этому сильно подымается. Для распыления нефти служит пульверизатор (форсунка) (рис. 2): струя водяного пара из котла поступает в наружную оболочку *b* из нефтяного резервуара[1]; в пламени нефтяной форсунки легко плавится огнеупорный кирпич.

Гораздо более удобным горючим материалом является газообразное топливо; в лабораторной практике пользуются почти исключительно светильным газом[2], доставляемым городскою газовою канализациею; чтобы получить высокую температуру, надо газ возможно лучше смешать с воздухом; это легко достигается следующим простым приемом, указанным знаменитым химиком Бунзеном: вытекающий из трубочки *a* (рис. 3) светильный газ попадает в канал *b*, снабженный отверстиями *c*; быстро протекая мимо этих отверстий, он увлекает с собою прилегающий воздух и внутри канала смешивается с ним; зажигая у верхнего конца канала вытекающую смесь, мы получаем настоящее, очень горячее пламя. Убедиться в высокой температуре бунзеновского пламени всего нагляднее можно, внося в него небольших размеров тугоплавкие вещества, которые тотчас же добела раскаливаются: газокалильная горелка Ауэра [1], которою теперь так часто пользуются для освещения магазинов и улиц, представляет собою не что иное, как бунзеновскую горелку, в пламени которой раскаливается тонкая сетка («чулок» Ауэра), сделанная из окислов циркона, лантана и дидима.

Огромное удобство пользования газом для нагревания создало в лабораторной практике целый ряд печей, предназначенных для различных специальных целей, в которых бунзеновское пламя сгорает внутри глиняных (шамотных) сосудов; чтобы увеличить количество выделяемого тепла, увеличивают количество притекающего газа и воздуха, пользуясь побудительными тягами или воздуходувными приспособлениями (мехами): так называемая «паяльная горелка Бунзена», дающая возможность очень просто получать более высокие температуры, по конструкции походит на нефтяную форсунку (см. рис. 2) с тою разницею, что по внутреннему каналу *a* идет воздух, подаваемый мехами, а по наружному *b* подтекает све-

---

[1] При лекционной демонстрации принципа форсунки вместо водяного пара можно пользоваться воздухом нагнетательного насоса, а вместо нефти (для избежания запаха и копоти) — спиртом, к которому примешана одна треть эфира.

[2] Светильный газ получается при сухой перегонке каменного угля: каменный уголь помещается в закрытые глиняные реторты и без доступа воздуха подвергается сильному нагреванию; при краснокалильном жаре происходит разложение: выходящий из реторты газообразный продукт очищается, собирается в газометры и оттуда поступает в канализационную сеть; в ретортах остается кокс. Светильный газ представляет собою смесь водорода (40%) и газообразных углеводородов.

тильный газ; эта паяльная горелка особенно часто употребляется для прокаливания и для приготовления различных аппаратов из стеклянных трубок [1].

Во всех процессах горения, в которых из экономии пользуются кислородом воздуха, в пламя приходится вводить и азот, объем которого в четыре раза больше объема кислорода: развиваемая в пламени теплота расходуется на совершенно бесполезное нагревание азота, что отзывается и на температуре пламени. Устранить этот охлаждающий фактор нетрудно, если пользоваться не атмосферным воздухом, а чистым кислородом, вводя его вместо воздуха во внутренний канал паяльной лампы: при раскаливании в этом пламени известкового цилиндра или пластинки из окиси циркония мы получаем ослепительный свет (друммондов свет) [2] и можем пользоваться этим источником для проекционного фонаря. Еще несколько более высокую температуру мы получаем, заменяя светильный газ чистым водородом: в этом пламени легко плавится платина и иридий, чем и пользуются при изготовлении разных аппаратов из этих металлов: получаемая здесь температура доходит до 2500°.

В технике пользование газообразным топливом также распространено, с той разницей, что здесь, вместо дорогого светильного газа, применяют гораздо более дешевый, так называемый «генераторный газ», получаемый при неполном сгорании топлива [2] в специально устроенном генераторе. В целом ряде производств, не допускающих копоти в нагревающем пламени и требующих тщательной регулировки температуры (приготовление оптического и других высоких сортов стекла, глазирование фарфора и т. д.), газовое топливо находит себе обширное применение.

Указанные способы получения высоких температур невозможны без специально приспособленных печей, прогревание которых требует продолжительного времени. В настоящее время техника обогатилась еще одним новым замечательным способом быстрого получения весьма высоких температур — способом Гольдшмидта [3]: здесь мы также встречаемся с процессом окисления, но горючим материалом является металлический алюминий, а кислород доставляется не воздухом, а окислом какого-либо металла (например, железа или хрома); опыт производится весьма просто: в огнеупорный тигель насыпают хорошо перемешанную смесь из окиси железа и порошка металлического алюминия [3]. При обыкновенной тем-

---

[1] В помещениях, не имеющих газопровода, пользуются парами летучих веществ (например, бензина), смешивая их с воздухом или кислородом; на опасность взрыва и пожара в этих случаях следует обращать особое внимание.

[2] При обильном подтоке воздуха происходит полное сгорание и образование углекислоты (CO_2); проходя сквозь слой сильно нагретого угля, лежащий над горящим углем, углекислота раскисляется, соединяясь с новым количеством угля и давая окись углерода (CO); эта последняя и есть «генераторный газ», который в присутствии кислорода воздуха легко окисляется (горит), образуя углекислоту CO_2.

[3] При повторении этого опыта рекомендуется особая осмотрительность, так как тигли нередко проплавляются, и тогда расплавленная масса, вытекая, легко мо-

пературе эта смесь может спокойно лежать неопределенно долгое время без каких-либо изменений; но достаточно хотя в одном месте нагреть ее, чтобы тотчас началась энергичная реакция, выделяющая колоссальное количество тепла: скоро — через одну или две минуты — вся масса прогревается, реакция идет замечательно быстро, тигель ярко накаливается и, если мы его наклоним, из него вытекает совершенно жидкое железо, испускающее ослепительно яркий свет. При употреблении окиси хрома вместо окиси железа температура реакции доходит до 3000°.

Способ Гольдшмидта, назначение которого состоит главным образом в получении ценных металлов из окислов за счет окисления сравнительно дешевого алюминия, может служить и источником высокой температуры, быстро дающим большое количество тепла; поэтому он имеет ряд технических приложений: так, желая соединить две железные части, мы надавливаем их друг на друга, окружаем отвешенным количеством нагревающей массы и проводим реакцию: тепло выделяется так быстро[1], что через одну или две минуты сдавленные части доходят до белого каления и слипаются («свариваются»), тогда как более удаленные части остаются при обыкновенной температуре и только потом слегка нагреваются. Наконец, получаемое металлическое железо может служить материалом для поправки неудачно отлитых или поломанных чугунных частей, так как оно выделяется при такой высокой температуре, что непосредственно к нему прикасающиеся части чугуна плавятся, смешиваются с ним и по охлаждении представляют одно целое.

До сих пор мы рассматривали химические источники тепла; наивысшая температура, которой мы можем тут достигнуть, обусловливается температурой диссоциации, как было указано выше. В настоящее время лаборатория и техника все шире и шире пользуется другим приемом получения высоких температур, и достижение высшего их предела стесняется здесь только недостаточною тугоплавкостью печей; этот прием заключается в применении электрической энергии к нагреванию.

Простейшая форма превращения электрической энергии в тепловую — это нагревание проводника током: лампы накаливания представляют собою практическое приложение выделяющегося в угольной нити тепла для целей освещения.

Еще гораздо более высокую температуру получают в вольтовой дуге. Если два угольных стержня, соединенных с полюсами сильного источника

жет причинить пожар; предупредить опасность можно, ставя тигель на кирпич, положенный на толстый (20 *см*) слой сухого песка. Окись железа надо перед опытом прокалить, чтобы удалить влагу и тем избегнуть взрыва.

[1] Чтобы демонстрировать быстроту нагревания, берут железный лист (40 × 40 *см* толщиною 5 *мм*) и на средину его кладут немного нагревательной смеси, производят реакцию и потом, по мере надобности, еще подбавляют смеси металлической ложкой, покуда лист не проплавится; тотчас же после этого его можно взять за края руками и показать отверстие, не рискуя получить ожоги; проплавлять над толстым слоем сухого песка.

электрического тока, сблизить между собою до соприкосновения, то цепь замкнется и станет нагреваться; в особенности сильно нагреваются угли, как обладающие несравненно бо́льшими сопротивлениями, чем остальная часть цепи; при достаточном токе угли раскаляются в месте своего соприкосновения; мало того, они здесь возгоняются (т. е. испаряются, не переходя через жидкое состояние, подобно тому как при температурах ниже 0° лед непосредственно испаряется, не переходя в воду); если такие угли раздвинуть, то между ними и образуется вольтова дуга — струя раскаленного угольного пара, по которой будет итти электрический ток от одного угля к другому; с боков эта струя ограничена поверхностью, вне которой угольные пары охлаждены; внутри же этой поверхности па́ры имеют температуру возгонки угля, которая оценивается (при атмосферном давлении) в 3800°.

Помимо этих теоретических соображений, наблюдения над яркостью свечения вольтовой дуги тоже показывает, что ее температура постоянна: увеличивая ток, образующий вольтову дугу, мы увеличиваем силу всего даваемого ею света (ибо увеличим как длину дуги, так и раскаленную поверхность углей), но не изменим яркости ее свечения (т. е. количества света, даваемого каждым *мм*² дуги); но последняя зависит от температуры источника света. Итак, постоянство яркости свечения вольтовой дуги указывает на постоянство ее температуры.

Жаром вольтовой дуги как очагом весьма высокой температуры с замечательным успехом воспользовался знаменитый французский химик Муассан [4]. Расположение печи, называемой «печью Муассана», таково: чтобы все тепло, излучаемое вольтовой дугой, использовать для нагревания и чтобы избежать охлаждений циркулирующим воздухом, вольтова дуга образуется внутри огнеупорного известкового ящика (рис. 4). Электрический ток подводится при помощи гибких проводников (медных проволочных канатов) к углям: эти последние входят через отверстия в стенках известкового ящика; между концами их образуется вольтова дуга, излучением нагревающая поставленный внизу маленький угольный тигель, в который помещают исследуемое тело или нагреваемую смесь. Самый опыт продолжается недолго (десять, двадцать минут), да он и не может продолжаться дольше, так как известковый ящик не выдерживает развиваемой колоссальной температуры, раскаляется, трескается и, наконец, сплавляется[1].

---

[1] Количество тепла, выделяемое электрической энергией при нагревании, будь то в сплошном проводнике, будь то в вольтовой дуге, легко вычислить: количество энергии, выделяемое в течение секунды в цепи с током в 1 *а* и при разнице напряжения между данными точками цепи в 1 *в*, равно 1 *вт*. Известно, что 736 *вт* = 1 *л. с.* (лошадиной силе), и что 42 *вт* дают 1 *кал* тепла в течение одной секунды. Большая печь Муассана требует 2000 *а* при 70 *в*, т. е. 140 000 *вт*, или работу приблизительно в 200 *л. с.* для вращения динамомашины, дающей электрический ток. Для технических приложений пользуются в настоящее время печами, поглощающими до 1000 *л. с.* рабочей способности гидравлического двигателя.

Муассан воспользовался жаром устроенной им печи для раскисления при помощи угля окислов некоторых металлов, открыл ряд новых соединений разных элементов с углеродом, указал способ получать искусственные алмазы и т. д.

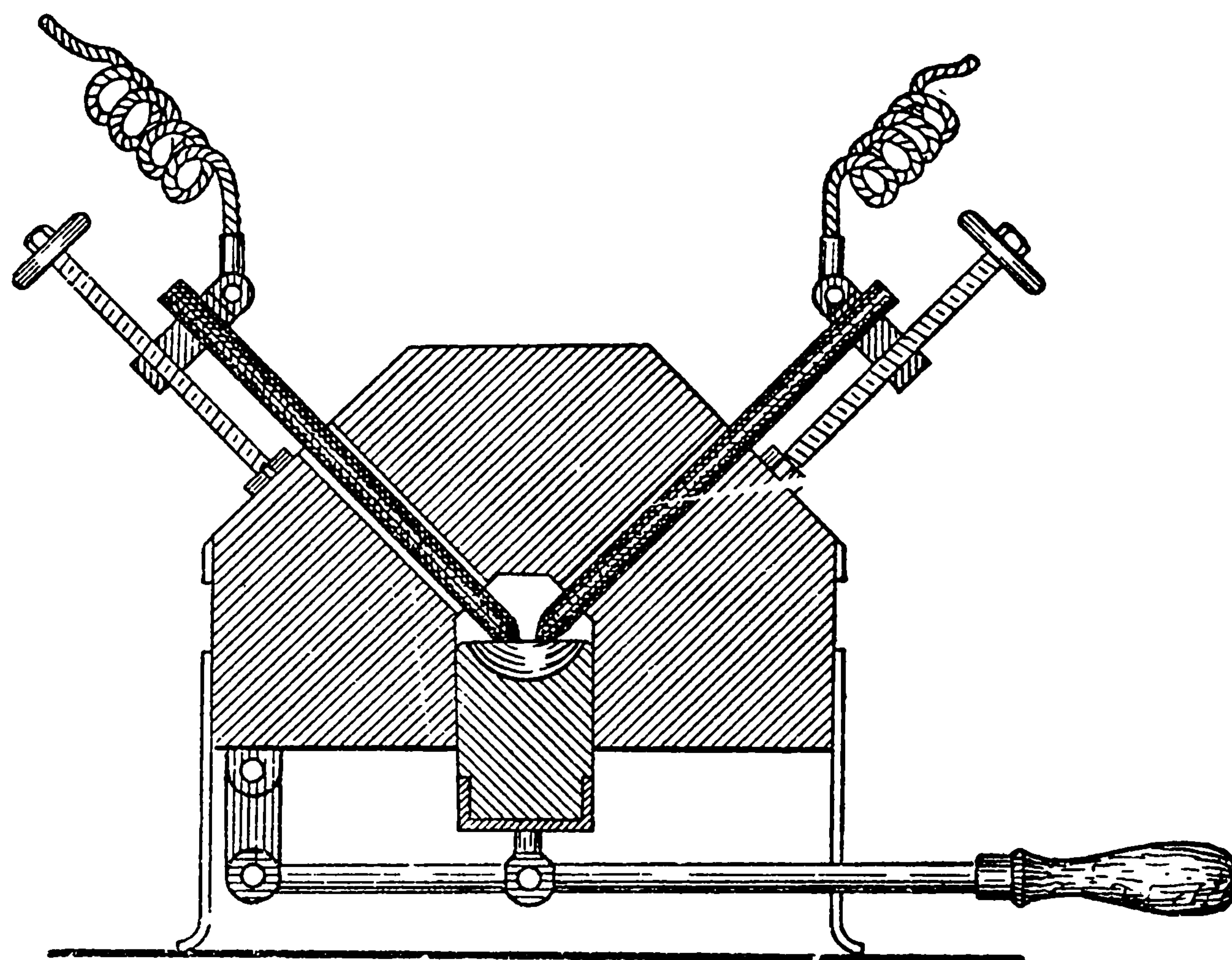


Рис. 4.

Еще раньше Муассана американцы братья Каульз [5] в большом масштабе воспользовались жаром вольтовой дуги для раскисления окислов алюминия; здесь совершается тот же процесс, о котором мы говорили при описании доменной печи, только при более высокой температуре; все количество алюминия, находящееся в настоящее время в продаже, добыто этим путем.

Пользуясь дешевою гидравлическою силою, современная техника широко применяет добытые в лабораториях результаты для фабричного производства в электрических печах алюминия, карбида[1] и других продуктов: статистические данные показывают, что в настоящее время более 250 000 *л. с.* беспрерывно, денно и нощно расходуются для нагревания электрических печей.

Остается еще упомянуть один очень простой способ получать высокие

[1] Карбид представляет собою химическое соединение углерода с кальцием; его получают из смеси угля и извести (окисла кальция) в жару электрической печи; известь раскисляется, и выделившийся свободный кальций соединяется с избытком угля. Карбид служит для получения очень ярко горящего газа — ацетилена; погруженный в воду, карбид разлагается сам и разлагает при этом воду, причем кальций соединяется с ее кислородом, а водород переходит к углю, давая газообразный продукт — ацетилен.

температуры, собирая лучи Солнца при помощи линзы (зажигательного стекла) или лучше для избежания поглощения инфракрасных лучей с помощью вогнутого металлического зеркала. Практического приложения этот способ до сих пор не имел, если не считать защиты Сиракуз Архимедом, который, концентрируя зеркалами лучи солнца на неприятельские корабли, зажег их. Но если мы внимательно присмотримся к получению высоких температур при помощи горючих веществ или при помощи гидравлических двигателей и динамомашин, то и здесь мы увидим проявление солнечной энергии, которая, разлагая углекислоту, накоплялась в растениях или затрачивалась на образование облаков и, наконец, возвращалась в виде мощного потока, вращающего наши динамомашины.

Москва, 1899.

15. МАКСВЕЛЛО-БАРТОЛИЕВЫ СИЛЫ ДАВЛЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

(Сообщение, сделанное на Интернациональном Конгрессе физиков в Париже в августе 1900 г.)

В своей электромагнитной теории света Maxwell показал, что те электрические и магнитные силы, которые являются нам как механические (пондеромоторные) силы, действующие в среде электрически или магнитно поляризованной, непременно должны проявляться в пучке световых лучей; Maxwell говорит в своем «Treatise on Electricity a. Magnetism» (§ 792):

«В среде, в которой распространяются волны, существует давление в направлении, нормальном к волне, и численно равное количеству энергии в единице объема».

Следуя совершенно иному пути и, как кажется, не зная результатов, полученных Maxwell'ом, Bartoli [1] пришел к тем же выводам [1]; он указал круговые процессы, которые позволяют при помощи подвижных зеркальных поверхностей переводить энергию, излучаемую более холодным телом, на тело, более теплое, и Bartoli вычислил ту работу, которую необходимо затратить в этом случае, на основании принципа Carnot. Необходимость затрачивать работу при передвижении зеркальной поверхности в направлении, противоположном падающей лучистой энергии, заставляет принять существование давления на отражающую поверхность, обусловленного падающей на нее лучистой энергией. Bartoli сделал подсчет величины этого давления; он нашел величину, согласную с величиной, вычисленной Maxwell'ом.

По методу, близко подходящему к методу Bartoli, Boltzmann [2], князь

---

[1] A. Bartoli. Exner's Rep. d. Phys., **21**, p. 1989, 1884.

[2] Boltzmann. Wied. Ann., **22**, p. 33 и 616, 1884.

Голицын [1] и Ch. Ed. Guillaume [2] вычислили величину этого светового давления для некоторых случаев.

Когда пучок параллельных лучей падает отвесно на плоскую поверхность, то производимое им давление p определяется количеством E энергии, падающей на эту поверхность в течение одной секунды, коэффициентом отражения ее ρ (этот коэффициент варьирует от 0 для черного тела до 1 для зеркала), а также скоростью v распространения колебаний в среде.

$$p = \frac{E}{v}(1 + \rho).$$

Это давление весьма мало. Как Maxwell, так и Bartoli вычислили, что пучок солнечных лучей, падая отвесно на поверхность 1 *м*², производит давление, которое для поглощающей черной поверхности равно 0,4 *мг*, а для отражающей зеркальной — 0,7 *мг*.

Обоснование и подсчет указанного давления, сделанные в выводах как Maxwell'а, так и Bartoli, неявно заключают в себе гипотетические предположения относительно некоторых простых свойств отражающих и поглощающих поверхностей; однако еще не доказано, что эти простые свойства действительно встречаются в телах, которые мы знаем, и, следовательно, имеют ли место силы Maxwell'а — Bartoli в случае действительных тел, избирательно поглощающих и отражающих,— это вопрос, который может быть разрешен только на основании новых, дополнительных исследований; наиболее простой путь представляет прямой опыт. Попытки, сделанные в этом направлении Zöllner'ом [3] и Bartoli (loc. cit), не дали положительных результатов; вот почему я предпринял экспериментальное исследование этих давлений.

Обнаружению сил Maxwell'а — Bartoli препятствуют значительные затруднения. Опыт показывает, что на тела, на которые падает лучистая энергия, начинают действовать разные силы, происходящие от нагревания тела и обусловленные газами и парами, окружающими тело; эти добавочные силы, которые могут при известных обстоятельствах значительно превосходить силы Maxwell'а — Bartoli, могут быть сведены к двум независимым действиям. Во-первых, это суть силы, обусловленные переносом (конвекцией) газа, который, нагреваясь вблизи тела, начинает подыматься кверху и увлекает тело в ту или другую сторону, силы, уже замеченные Fresnel'ем [4]. Во-вторых, это суть силы радиометрические, которые были открыты и исследованы W. Crookes'ом [5]: эти силы обусловлены разностью температур сторон тела, освещенной и находящейся в те-

---

[1] B. Galitzine. Wied. Ann., 47, p. 279, 1892.
[2] Ch. Ed. Guillaume. Pogg. Ann., 31, p. 121, 1894.
[3] F. Zöllner. Pogg. Ann., 160, p. 154, 1877.
[4] A. Fresnel. Ann. d. Chim. et de Phys., 29, p. 57 и 107, 1825.
[5] W. Crookes. Philos. Trans., 1873—1879.

ни, и зависят также от кривизны поверхности тела и непосредственного соседства других поверхностей.

Чтобы исключить эти пертурбирующие силы, опыт был расположен следующим образом; в большом стеклянном баллоне ($D = 20$ *см*) на тонкой стеклянной крутильной нити был подвешен стеклянный стержень H (рис. 1), на котором укреплены две пары крылышек из платиновой жести P_1 и P_2. Каждая пара крылышек состояла из двух кружков (диаметром 5 *мм*), центры которых находились в расстоянии 10 *мм* от оси вращения. Один из кружков каждой пары был металлически блестящий с двух сторон; другие две были электролитически покрыты платиновой чернью, также каждый с двух сторон. Обе

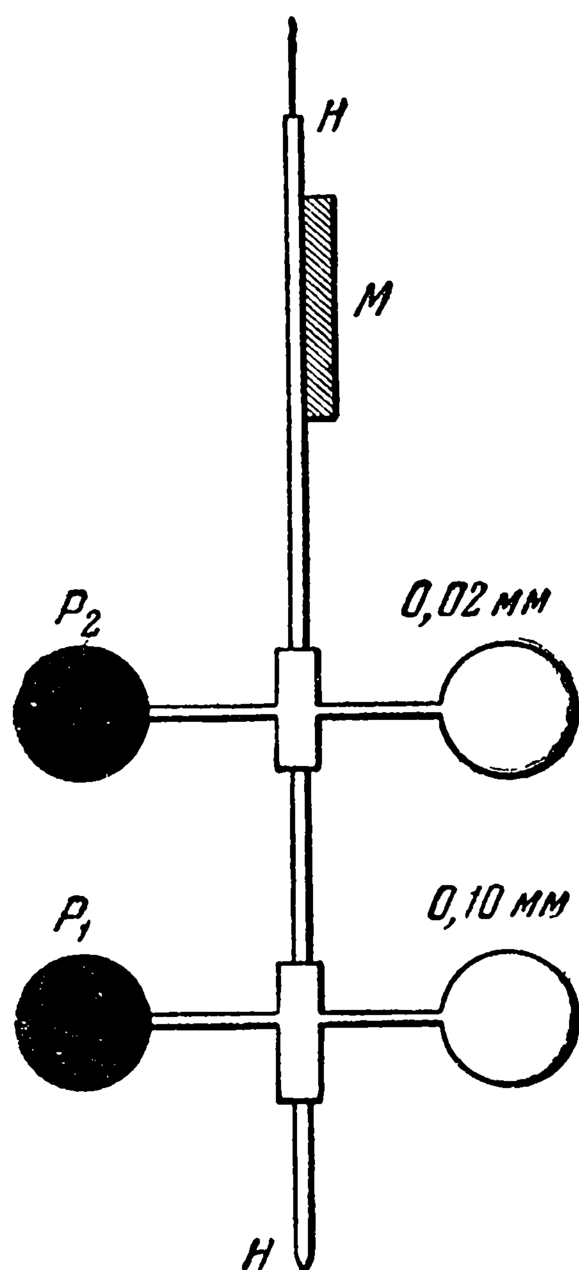


Рис. 1.

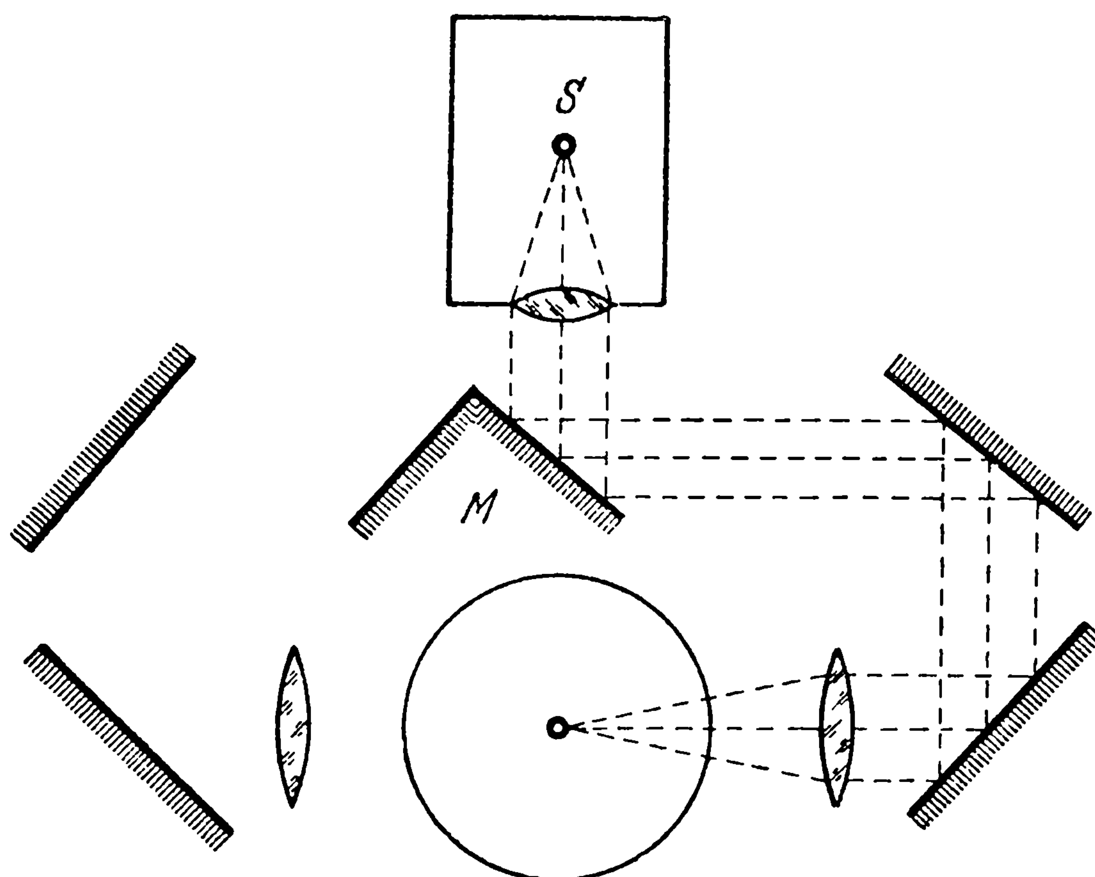


Рис. 2.

пары крылышек разнились только толщиною жести (0,10 *мм* и 0,02 *мм*); более толстое подвергалось и в пять раз более долгому платинированию.

Стеклянный стержень был снабжен зеркалом M для наблюдения, трубой и шкалой угла кручения нити.

Для того чтобы исключить пертурбирующие силы переноса (конвекция) газа, которые зависят от разницы температур крылышка и стеклянного баллона и не зависят от направления пучка света, нагревающего крылышко, было принято следующее расположение опыта (рис. 2, план): свет дуговой лампы S (30 *а*) можно было направлять на ту или другую сторону крылышка при помощи системы зеркал и линз простым передви-

жением двойного зеркала M; разница отклонений в этих двух случаях не зависит от конвекции.

Для уменьшения пертурбирующих радиометрических действий опыт был поставлен в такие условия, чтобы эти силы были по возможности малы: диаметр стеклянного баллона был достаточно велик ($D = 20$ *см*), и крылышки были сделаны из плоского платинового листа, для того чтобы избежать влияния кривизны поверхности. Действие радиометрических сил, которое обусловлено разницей температур двух поверхностей освещаемого кружка, может быть исключено простым подсчетом, который основывается на сравнении отклонений, даваемых крылышком толстым (в 0,10 *мм*) и крылышком тонким (в 0,02 *мм*); разницы температур и, следовательно, величины радиометрических сил в первом случае в пять раз больше, чем во втором; отсюда мы можем вычислить на основании полученных отсчетов, как велико было бы отклонение для бесконечно тонкого крылышка, для которого радиометрическое действие равняется нулю.

Для того чтобы сделать наблюдения возможными, необходимо уменьшить как конвекционные, так и радиометрические силы, достигая возможно большого разрежения при помощи насоса Sprengel'я, разрежение можно было считать достаточным, если на тонкое зеркальное крылышко световой пучок давил сильнее, чем на тонкое зачерненное (действие в направлении, противоположном радиометрическим силам).

Опыты показывают, что, помимо конвекционных и радиометрических сил, существуют еще силы давления, которые производит пучок падающего света на крылышки, и что эти силы (почти в два раза) больше для отражающих крылышек, чем для поглощающих.

Чтобы узнать, в каком отношении находятся найденные силы к силам давления лучистой энергии, необходимо было измерить в абсолютных единицах отношение между энергией падающих лучей и величиной вызванного давления.

Количество падающей лучистой энергии было измерено следующим образом: стеклянный баллон с крылышками был удален, и на то место, где находился освещенный кружок крылышка, помещалась круглая диафрагма D (рис. 3), отверстие которой было равно размеру кружка; лучи дуговой лампы, прошедшие через эту диафрагму, падали на поглощающую их зачерненную поверхность маленького калориметра: кусок меди C (30 *г*) снабжен калориметрическим термометром T, шарик которого находится в углублении, наполненном ртутью.

Механические силы, действующие на крылышко, измеряются углом кручения и расстоянием центра кружка от оси вращения; момент кручения нити измерялся в абсолютных единицах по методу Coulomb'a (наблюдение времени качания, когда к нити подвешено тело, момент инерции которого известен).

Результаты измерений, мною сделанных, можно формулировать таким образом: опыты показывают, что пучок света, падая на отражающие или

поглощающие плоские поверхности, производит на них давление, которое в пределах погрешности наблюдений равно световому давлению по Maxwell'y — Bartoli.

Здесь я позволю себе обратить внимание также на одно приложение сил Maxwell'a — Bartoli, существование которых теперь вне сомнения

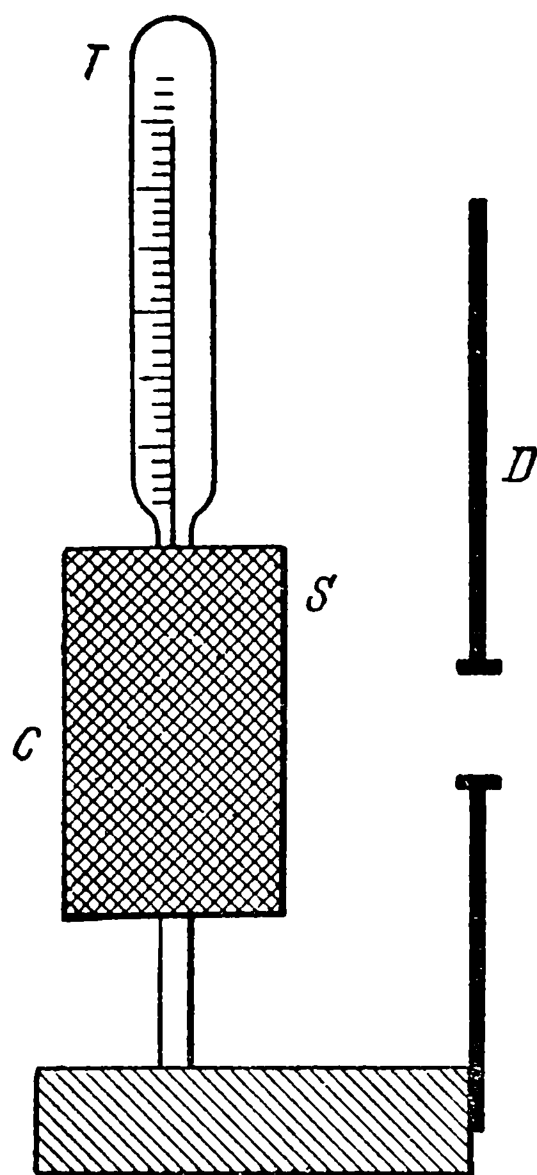


Рис. 3.

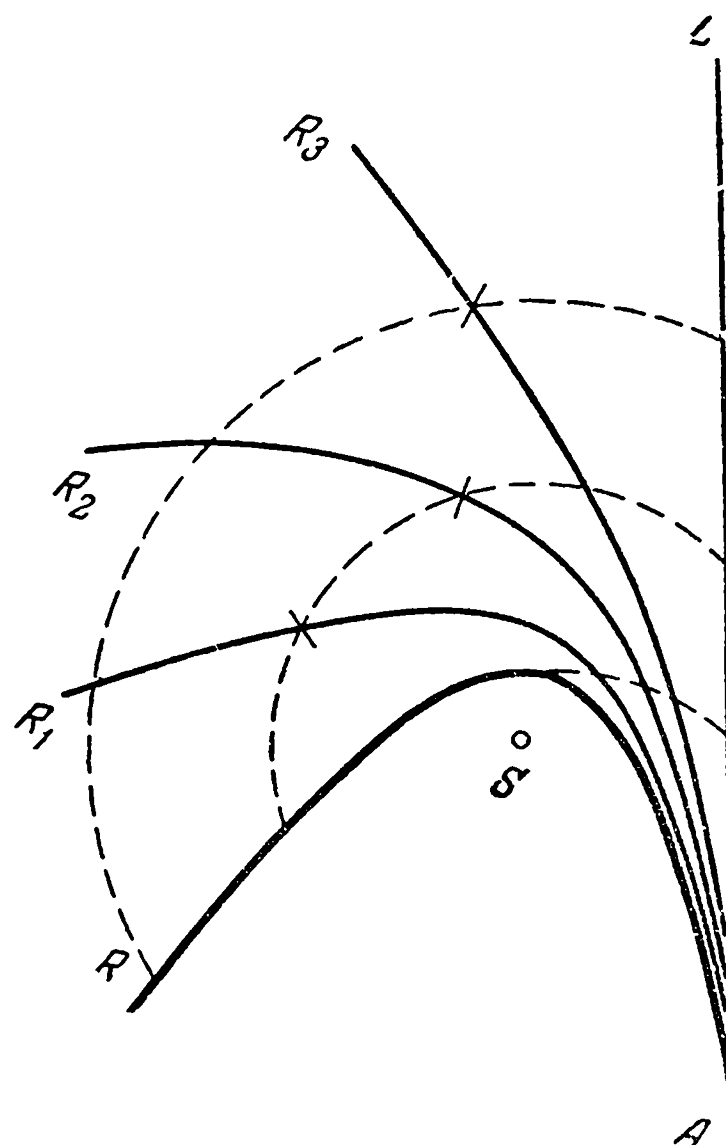


Рис. 4.

на основании изложенных выше опытов; дело касается приложения их в области астрономических вопросов, на что я уже ранее указывал[1].

Нетрудно вычислить величину отталкивательной силы Солнца, обусловленной силами Maxwell'a — Bartoli, с которой оно действует на шаровидное тело, радиус r которого дан в *см*, основывая расчет на хорошо известной нам постоянной солнечной радиации; с другой стороны, можно вычислить и силу, с которой Солнце притягивает тот же шар, если плотность последнего δ дана, и тогда следует, что результирующая притягательная сила Солнца F, измеренная в гравитационных единицах, выражается (loc. cit.) формулою

$$F = 1 - \frac{1}{10\,000\, r\delta}.$$

[1] P. Lebedew. Wied. Ann., 44, p. 292, 1892.

Эта формула позволяет видеть, что отталкивание, обусловленное излучением Солнца, должно явиться существенным фактором в случае движения комет, которые представляют собою рой метеоритных камней; при благоприятных условиях наблюдения возможно, что уклонение в 0,0001 в величине силы притяжения Солнца может быть обнаружено; эта величина уклонения соответствует камню, размеры которого менее 1 *см*; мы отсюда и обратно можем вывести заключение, что то, что мы называем «головою кометы», представляет собою рой довольно больших метеоритных камней и что, с другой стороны, невозможно, чтобы эта голова состояла из космической пыли.

Указанная выше формула позволяет нам предвидеть явления, которые будут иметь место в случае роя малых метеоритов разных размеров; если в какой-либо точке пространства A (рис. 4) направление и скорость роя даны, мы находим, что все большие камни (голова кометы) опишут одну и ту же траекторию R по законам, давно установленным. Более мелкие камни опишут разные траектории R_1, R_2...; для камней микроскопических размеров (менее 0,001 *мм*) эта траектория обращается в прямую линию L (притягательная сила Солнца уравновешивается отталкивательной силой его лучеиспускания)[1]; рой будет беспрерывно деформироваться, принимая все более и более продолговатую и изогнутую форму. Малые камни скоро будут рассеяны в мировом пространстве, сделаются недоступными наблюдению, и мы будем замечать только беспрерывное изменение головы кометы.

Периодическая комета может, деформируясь, обратиться в кольцо метеоритов, период обращения главного скопления которого мы не можем предвычислить по известным способам, по той причине, что у нас нет точных данных касательно размеров и массы отдельных камней, образующих главное скопление[2].

Эти особенности в движениях комет, на которые мы указали, уже давно известны, но им до сих пор еще не было дано удовлетворительного объяснения.

Деформации кометных голов могут быть весьма сложны в зависимости от многих физических причин; но один из факторов, с которыми мы теперь должны считаться, — это безусловно силы светового давления Maxwell'а — Bartoli.

---

[1] Частички, еще меньшие, или отдельные газовые молекулы Солнце будет вероятно отталкивать, но как подсчеты Maxwell'а — Bartoli, так и наши опыты относятся только к случаю, когда тело велико сравнительно с длиною волны падающих на него лучей.

[2] Может быть, в этом кроется невозможность предвычислить движение Бьелид.

16. СИЛЫ МАКСВЕЛЛА — БАРТОЛИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ДАВЛЕНИЕМ СВЕТА

(Rapp. Congr. Internal. de Physique, **2**, *p. 133—1401, 1900*; *ЖРФХО*, **32**, *стр. 232, 1900)*

В баллоне, из которого выкачан воздух (20 *см* диаметром) подвешены на стеклянной нити две одинаковых пары крыльев из листовой платины различной толщины (соответственно 0,1 и 0,02 *мм*); одно из крыльев каждой пары гладко отполировано, другое с обеих сторон покрыто платиной (более толстое платинировано в пять раз сильнее, чем более тонкое). Свет дуговой лампы концентрируется с помощью зеркал и двояковогнутых стекол на исследуемом крыле; он может быть направлен произвольно на одну или другую сторону крыла при помощи смещения пары зеркал, причем в обоих случаях наблюдается кручение стеклянной нити (посредством зеркала и шкалы). Измеренная разность угла кручения не зависит от тех смещений крыла, которые вызываются конвекционными токами в оставшемся газе. Чтобы исключить влияние круксовых радиометрических сил, наблюдения более тонкого и более толстого крыла сравниваются друг с другом попарно, и вычисляется величина кручения, которая имела бы место для бесконечно тонкой (без радиометрического влияния) отражающей или поглощающей поверхности, в предположении, что радиометрические силы прямо пропорциональны толщине. Наблюдения показали, что сила давления света для отражающей поверхности почти вдвое больше, чем для поглощающей.

Чтобы найти отношение между падающим количеством энергии излучения и возникающими пондеромоторными силами в абсолютной мере, упомянутое количество энергии определялось с помощью соответствующего калориметра, и силы давления вычислялись в абсолютной мере из расстояния центра крыла от оси вращения, угла кручения и упругой постоянной стеклянной нити (которая измерялась по методу Кулона).

Измерения показали, что установленное Максвеллом — Бартоли соотношение

$$P = \frac{E}{v}(1 + \beta),$$

где P — сила давления,

E — количество энергии, падающее в одну секунду нормально к поверхности,

v — скорость света и β — отражательная способность поверхности,

вполне выражает результаты опыта в пределах ошибок наблюдений.

К этим опытам автор присоединяет еще соображения о том, каким образом метеоритный рой, движущийся по своей орбите, деформируется под влиянием отталкивательной силы Солнца.

17. ПО ПОВОДУ ЗАМЕТКИ ПРОФ. Д. А. ГОЛЬДГАММЕРА в ЖРФХО, 33, р. 34, 1900

*(ЖРФХО, ч. физ., **33** (1), ч. стр. 66, 1901)*

Указанная заметка вызвана ошибкой со стороны проф. Д. А. Гольдгаммера, неправильно предположившего, что я перестал заниматься световым давлением и что помещенное в ЖРФХО, **32**, стр. 211, 1900, сообщение представляет собой окончательную редакцию моих работ по этому вопросу: означенная статья — только перевод того сообщения, которое мною сделано в Париже и которое напечатано в отчетах Интернационального Конгресса (Rapports présentés au Congrès Internationale de Physique, **2**, р. 133—140, 1900).

Задачей моего сообщения было познакомить присутствовавших физиков с методом и основными результатами моих работ, что, конечно, возможно, и это надо было сделать в общих чертах, опуская детали и протоколы наблюдений. Подробное изложение этих исследований появится в особой статье, как только мои работы будут закончены; в этой статье проф. Д. А. Гольдгаммер найдет и разрешение своих сомнений.

Москва. Май 1901

18. ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Развивая основные положения электромагнитной теории света, Maxwell (1873) обратил внимание и на те силы, которые являются нам в виде пондеромоторных сил во всякой магнитно или электрически поляризованной среде; из его теории неизбежно следует необходимость существования этих сил также во всяком пучке лучей, и Maxwell[1] говорит:

«В среде, в которой распространяется волна, появляется в направлении ее распространения давящая сила, которая во всякой точке численно равна количеству находящейся там энергии, отнесенной к единице объема».

Дальнейшее обоснование этих максвелловых сил давления электромагнитных волн мы находим у Heaviside[2] [1], Lorentz[3], Cohn [2][4] и Д. А. Гольдгаммера[5]. Bartoli (1876)[6] [2] пришел к тождественному выводу, следуя по совершенно иному пути и, видимо, не зная указанного Максвеллом свойства луча: Bartoli указывает круговые процессы, которые должны бы дать возможность при помощи подвижных зеркал переводить лучистую энергию от более холодного тела к более теплому, и вычисляет ту работу, которую надо затратить в этом случае согласно второму закону термодинамики. Необходимость затрачивать работу при передвижении зеркала навстречу падающему лучу заставляет предположить, что падающий луч давит на зеркало. Bartoli вычислил величину этого давления, результат, им полученный, совершенно совпадает с результатом, полученным Максвеллом.

---

[1] J. C. Maxwell. Treatise on electricity and magnetism, § 792.

[2] O. Heaviside. Electromagnetic Theory, I, p. 334. London, 1893.

[3] H. A. Lorentz. Versuch einer Theorie der electromagnetischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern, p. 29. Leiden, 1895.

[4] E. Cohn. Das electromagnetische Feld, p. 543. Leipzig, 1900.

[5] D. Goldhammer. Ann. d. Phys., 4, p. 834, 1901.

[6] A. Bartoli. Exner's Rep. d. Physik, 21, p. 1989, 1884; немецкий перевод из Nuovo Cimento, 15, p. 195, 1883.

По пути, указанному Bartoli, последовал Boltzmann [1], за ним кн. Б. Б. Голицын [2] и Guillaume [3] [3] при вычислениях давления лучей, а Drude [4] [2] распространил этот метод на абсолютно черное тело.

Если пучок параллельных лучей падает отвесно на плоскую поверхность, то величина максвелл — бартолиевого давления определяется количеством падающей в секунду энергии E, коэффициентом отражения поверхности и скоростью распространения луча v; тогда

$$p = \frac{E}{v}(1 + \rho),$$

где ρ заключено между 0 в случае абсолютно черной и 1 в случае абсолютно отражающей поверхности.

Величина этого давления лучей весьма мала. Как Maxwell, так и Bartoli вычислили, что лучи Солнца, падая отвесно на плоскую поверхность в 1 *м*^{2}, должны производить давление, которое в случае черной поверхности равняется 0,4, а в случае зеркала 0,8 *мг*.

Предположения, что лучи света должны производить давление, были высказаны уже гораздо раньше. Так, Кеплер (1619), стараясь объяснить характерную форму кометных хвостов, впервые высказал мысль, что эта форма обусловлена давлением солнечных лучей на частицы вещества хвостов; это предположение находилось в полном согласии с господствовавшей в то время гипотезой истечения и нашло горячую поддержку со стороны Лонгомонтануса [4] (1622) [5]. То же явление побудило и Эйлера (1746) [6] приписать световому лучу давящие силы, и он сделал попытку теоретически обосновать их, рассматривая световую волну (по Гюйгенсу) как продольное колебание.

De Mairan (1754) [7] [5] предпринял совместно с du Fay [6] первые весьма интересные опыты, чтобы убедиться в справедливости указанных выше предположений, но он должен был оставить их, так как конвекционные токи в окружающем воздухе препятствовали наблюдению предполагаемого явления: если принять во внимание те средства, которыми мог располагать экспериментатор в XVIII веке, то опыты de Mairan'а заслуживают самого большого удивления. Аналогичные опыты были предприняты потом Френелем (1825) [8], которого остановили те же затруднения: подробное

---

[1] L. Boltzmann. Wied. Ann., **22**, p. 33, 291, 616, 1884.
[2] B. Galitzine. Wied. Ann., **47**, p. 479, 1892.
[3] Ch. Ed. Guillaume. Archives des Sciences phys. et nat. de Geneve, **31**, p. 121, 1894.
[4] P. Drude. Lehrbuch des Optik, p. 447. Leipzig, 1900.
[5] См. ниже у de Mairan, p. 355—356.
[6] L. Euler. Histoire de l'Academie. Royale de Berlin., **2**, p. 121, 1746.
[7] De Mairan. Traité physique et historique de L'Aurore Boreale (Seconde Edition), p. 371. Paris, 1754.
[8] A. Fresnel. Ann. de Chimie et Phys., (2) **29**, p 57, 107, 1825.

изучение явлений, имеющих здесь место, повело Крукса[1] [2] к открытию радиометрических сил.

Максвелл — бартолиевы силы давления лучей могут со временем получить большое значение в вопросах физики и астрономии, а потому опытное исследование этих сил является тем более желательным, что теоретические обоснования их как по Maxwell'у, так и по Bartoli опираются на определенные элементарные свойства поглощающих и отражающих поверхностей, и потому может возникнуть вопрос, действительно ли только этими элементарными свойствами поверхностей обусловлены силы давления и в случае световых лучей. Этот вопрос может быть разрешен только при помощи дополнительных исследований; самым прямым путем является непосредственный опыт.

Попытки, которые сделали в этом направлении Zöllner [2][2] и Bartoli (l. c., стр. 205), не привели к дополнительным результатам; вот почему я и предпринял изложенное ниже опытное исследование светового давления[3].

I. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОПЫТЫ

В своем учебнике Максвелл (§ 793) говорит:

«Сконцентрированный электрический свет будет производить, вероятно, еще большее давление (чем солнечный свет), и нет ничего невозможного в том, что лучи такого света, падая на тонкую металлическую пластинку, легко подвешенную в пустоте, будут оказывать на эту пластинку заметное механическое действие».

Когда я приступал к своим опытам, я полагал, что расположение, указанное Максвеллом, не приводит к цели, так как на этом пути уже потерпел неудачу Цёлльнер[4], он же обратил внимание на то обстоятельство, что теоретически предсказанная Максвеллом числовая величина (светового давления) приблизительно в 100 000 раз менее той, которую наблюдал в одном частном случае Крукс[5]. Если и можно было надеяться уменьшить в очень значительной мере эти побочные радиометрические силы, то все же, казалось мне, решающее значение может иметь только такой опыт, в котором удастся каким либо образом компенсировать действие этих сил.

---

[1] W. Crookes. Philos. Transact. of the R. S. of London, **164**, p. 501, 1874; в этой работе находится сводка относящейся сюда литературы.

[2] F. Zöllner. Pogg. Ann., **160**, p. 154, 1877.

[3] Предварительное сообщение об этом исследовании было сделано мною на Первом интернациональном конгрессе физиков в Париже (в августе 1900); перевод сообщения помещен в ЖРФХО (ч. физич.) **32** [1], стр. 211, 1900.

[4] F. Zöllner. l. c. p. 155.

[5] В основу своего подсчета Целльнер положил малую величину для энергии излучения свечи. Если сопоставить радиометрические силы, которые наблюдал E. Nichols [7] (Wied. Ann., **60**, p. 405, 1897) с теми силами давления, которые вычисляются по Максвеллу и Бартоли из данных Ангстрема [8] (Wied. Ann., **67**, p. 647, 1899) относительно излучения свечи, то отношение получается около 10 000.

При исследовании радиометрических сил Шустер[1] [9] показал, что это суть внутренние силы радиометра; Риги[2] [2] подтвердил этот результат очень изящным опытом: «Я устроил так,— говорит Риги,— что радиометр плавал на поверхности воды вверх ногами; стеклянная шляпка мельницы лежала при этом на той трубке, которая обыкновенно удерживает вращающийся стержень мельницы в вертикальном положении.

Благодаря этому возникали силы трения, не допускавшие вращения мельницы. Когда я теперь направил на крылышко мельницы сильный пучок света, я не мог обнаружить ни малейшего вращения (радиометра)». К тому же выводу пришли и Бертэн [2] и Гарб[3] [10], повторявшие этот опыт.

Желая обнаружить на опыте максвелл — бартолиевы силы светового давления, я воспользовался расположением Риги в таком виде: между двумя кружками, вырезанными из тонкого листового никеля, была зажата согнутая в виде цилиндра слюдяная пластинка. Цилиндр служил телом радиометра; внутри его находилось неподвижно скрепленное с ним крылышко. Этот радиометр был подвешен на стеклянной нити внутри эвакуированного стеклянного баллона. Когда я направлял на крылышко свет дуговой лампы, я постоянно наблюдал[4] отклонения, которые были одного порядка с теми, которые вычисляются по Максвеллу — Бартоли[5].

Когда при этих предварительных опытах я стал изучать для сравнения силы, действующие на самое крылышко без слюдяной оболочки, я нашел, что наблюдаемые при этом радиометрические силы далеко не достигают величины, которую указывает Целльнер. Вызываемое ими возмущение оказывается даже меньше того возмущения, которое обусловливается конвекцией. Последняя проявляется в очень сильной степени при сравнительно крупных размерах наружного сосуда радиометра.

Поэтому я оставил этот метод и перешел к другим опытам, которые я произвел по простому методу, указанному Максвеллом.

II. РАСПОЛОЖЕНИЕ ОПЫТОВ И ПРИБОРЫ

Как ни просто максвелловское расположение опыта, оно встречает, однако, два существенных затруднения, обусловленных, с одной стороны, конвекционными токами, а с другой,— радиометрическими силами. При

---

[1] A. Schuster. Phil. Mag., (5) **2**, p. 313, 1876.

[2] A. Righi. Дословный перевод приведен у Bertin et Garbe; см. ниже.

[3] Bertin et Garbe. Ann. de Chim. et de Phys., (5) **11**, p. 67, 1877.

[4] Если Риги, а также Бертэн и Гарб не заметили никаких сил Максвелла — Бартоли, то это зависело исключительно от того, что их расположение, рассчитанное на гораздо большие радиометрические силы, было недостаточно чувствительно для измерения сил светового давления.

[5] Результаты этих предварительных опытов были доложены 17 мая 1899 г. в заседании Société Vaudoise в Лозане [11] (Arch. des Sc. phys. et nat. de Geneve, 8, p. 184, 1899). Случайные обстоятельства помешали своевременному появлению предполагавшейся обстоятельной заметки, и она осталась ненапечатанной.

самых высоких разрежениях эти побочные силы значительно уменьшаются, но и с ними все-таки приходится считаться при измерениях светового давления.

Возникновение конвекционных сил обусловлено тем, что при нагревании крылышка прибора падающими на него лучами одновременно нагреваются и прилегающие слои газа, благодаря чему образуется восходящее течение; если плоскость крылышка хотя немного наклонна по отношению к вертикали, то восходящее течение заставляет крылышко перемещаться, причем направление и величина этого перемещения зависят только от степени нагревания и не зависят от направления, по которому падают нагревающие лучи. Эти силы можно исключить при измерениях, заставляя лучи того же источника попеременно падать то с одной, то с другой стороны крылышка.

Что касается радиометрических сил, то они были сведены при моих опытах до возможного минимума тем, что был взят весьма большой стеклянный баллон[1] ($D = 20$ *см*), при помощи соответствующего светофильтра были исключены все лучи, которые могли бы быть поглощаемы стенками баллона[2], крылышки были сделаны из тонкого металла, для того чтобы разница температур обеих поверхностей была по возможности мала, и разрежение[3] было доведено (при помощи ртутного насоса и последующего охлаждения холодящей смесью) до возможно высокой степени.

Когда радиометрические силы малы, то вызываемую ими поправку при измерении светового давления можно вычислить на следующих основаниях: радиометрические силы обусловлены разницей температур освещенной и неосвещенной поверхности крылышка, причем для двух равновеликих крылышек из одинакового материала, имеющих одинаковые свойства поверхностей, эти силы прямо пропорциональны толщинам[4] крылышек; если мы будем одновременно наблюдать два одинаковых крылышка, имеющих очень значительную разницу толщин, то мы можем вычислить, как велико было бы отклонение, вызываемое световым пучком, если бы толщина крылышка была равна нулю, что соответствует и радиометрическим силам, равным нулю. Я позволю себе здесь же заметить, что эту поправку пришлось делать только для платинированных крылышек; у крылышек с зеркальными поверхностями радиометрические силы были,

---

[1] W. Crookes. Philos. Transact. of the R. S. of London, **170**, p. 113, 1879.

[2] Ibid. **168**, p. 266, 1878.

[3] W. Crookes, l. c., p. 300.

[4] В моих опытах разница температур между освещенным крылышком и стенками баллона была во много раз больше, чем разница температур между двумя поверхностями самого крылышка. Какой бы функции первой разницы температур ни соответствовала величина радиометрических сил, их пондеромоторное действие на крылышко представляет собою их разность на двух поверхностях крылышка, и эта последняя, с достаточной степенью приближения, прямо пропорциональна второй разнице температур.

против ожидания, настолько малы, что исчезали в неизбежных ошибках наблюдений, обусловленных другими причинами.

Помимо приведенных выше, по своей природе известных побочных сил, можно указать еще и на возможную гипотезу, что открытое Lenard'ом [12] и Wolf'ом[1] [13] распыление освещенных тел может сопровождаться

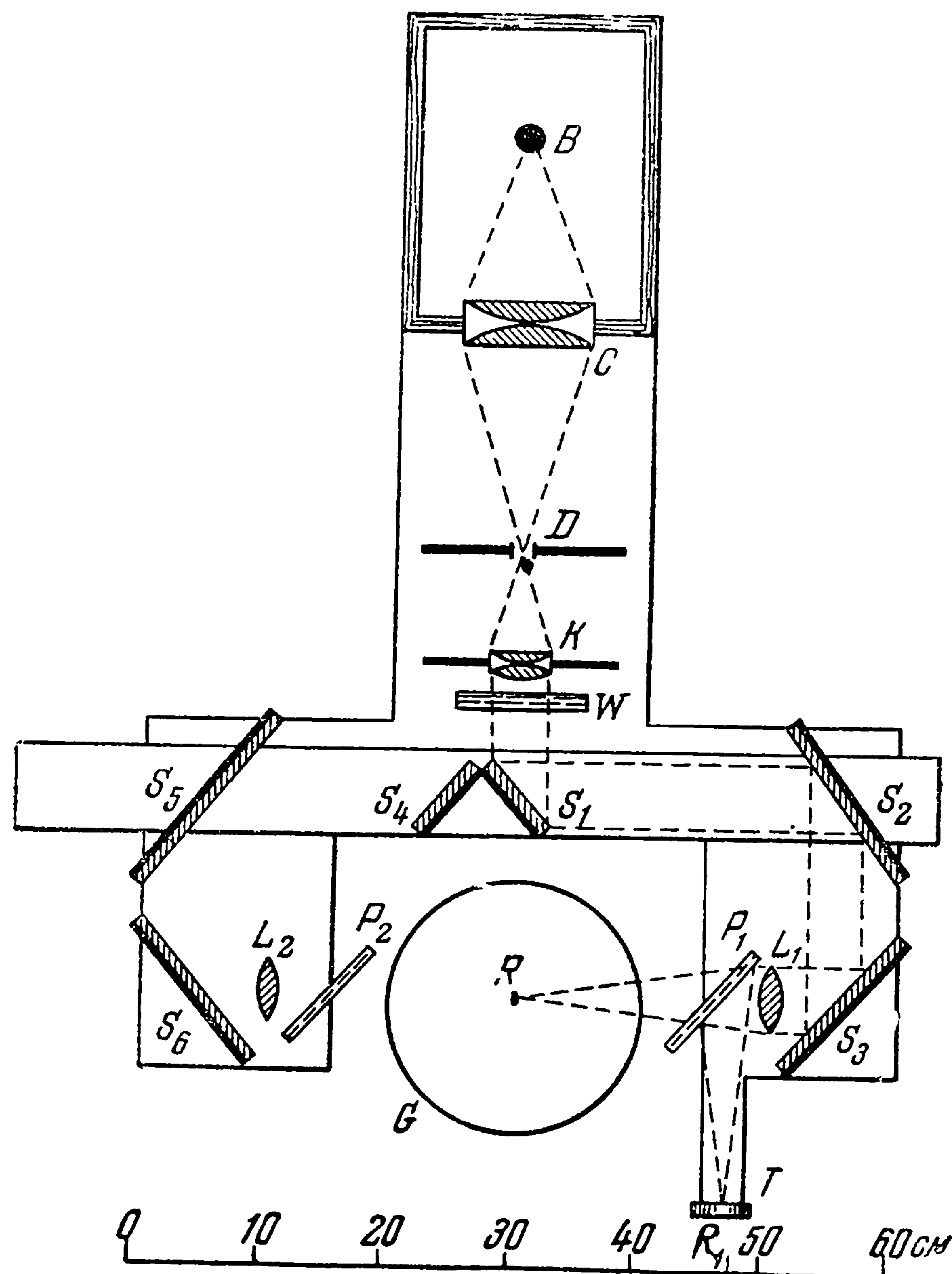


Рис. 1.

заметными реакционными силами, которые являются неизбежными спутниками максвелл — бартолиевых сил давления света; эти гипотетические добавочные силы должны, однако, зависеть как от длины волны падающего света, так и от химической природы крылышка: приведенные ниже опыты с цветными светофильтрами и с разными крылышками не дали возможности обнаружить сколь-нибудь заметного действия этих гипотетических реакционных сил.

[1] Ph. Lenard und M. Wolf. Wied. Ann., 37, p. 455, 1889.

Общее расположение приборов было следующее (рис. 1 план): изображение кратера B (+) угля дуговой лампы (30 *a*) собиралось при помощи конденсора C на металлическую диафрагму D ($d = 4$ *мм*). Выходящий из диафрагмы расходящийся пучок лучей падал на линзу K и шел дальше параллельным пучком; для того чтобы освободить этот пучок от ультракрасных лучей, за линзою K находился стеклянный сосуд с плоскопараллельными стенками W, наполненный чистой водой[1] (толщина слоя 1 *см*); для того чтобы изменить окраску лучей, в этом месте можно было помещать добавочное красное («фотографическое») стекло или заменять чистую воду голубым аммиачным раствором медной соли[2].

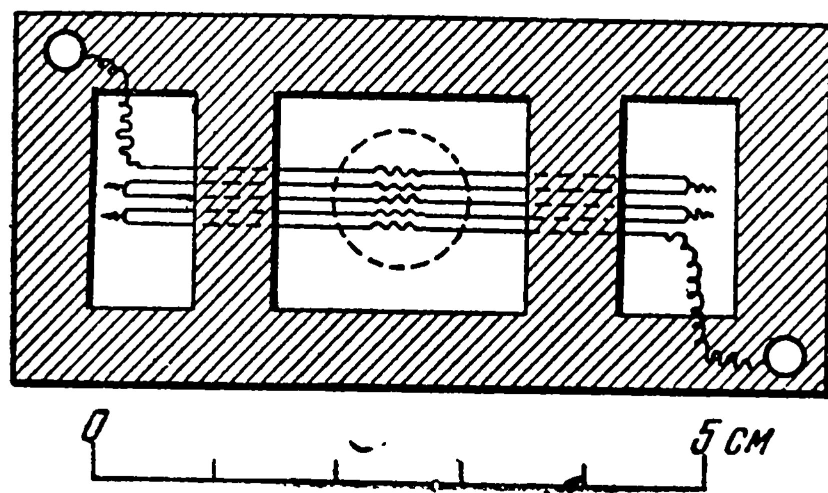


Рис. 2.

На своем дальнейшем пути пучок параллельных лучей претерпевал трехкратное отражение от стеклянных (амальгамированных) зеркал S_1, S_2 и S_3 и, собираясь при помощи линзы L_1, давал действительное увеличенное ($d' = 10$ *мм*) изображение R диафрагмы D внутри стеклянного баллона; при передвижении двойного зеркала S_1S_4 пучок лучей пробегал аналогичный путь и падал с другой стороны на крылышко, помещенное в стеклянном баллоне.

Линзы L_1 и L_2 имели каждая фокусное расстояние в 20 *см* при отверстии в 5 *см*; таким образом, конический пучок света имел угол схождений в 15°. Все приспособление с зеркалами было накрепко соединено с фонарем дуговой лампы; этот последний помещался на салазках, при помощи которых его легко было отодвигать от баллона; установочные винты и передвижение на салазках позволяли наводить пучок лучей на исследуемое крылышко.

Оградить результаты наблюдений от влияния тех случайных скачков в яркости света, которые неизбежно связаны с вольтовой дугой, возможно было только путем увеличения числа наблюдений.

Для того чтобы приводить отдельные ряды наблюдений к некоторой средней яркости света, служило следующее приспособление: между линзой L_1 (см. рис. 1) и стеклянным баллоном G была поставлена тонкая плоская пластинка P_1 под углом в 45° к направлению падающих лучей. Большая часть света свободно проходит через пластинку; отраженная часть

---

[1] Этим способом исключались все лучи $\lambda > 1{,}2\ \mu$; со своей стороны, стеклянные линзы задерживают ультрафиолетовые лучи.

[2] При красном, а также при голубом светофильтре количество проходящей световой энергии сокращается до одной пятой белого света; это служит доказательством того, что лучи, с которыми приходилось экспериментировать, почти исключительно принадлежали видимой части спектра.

света, собираясь, дает действительное изображение R_1 диафрагмы, которое падает на термобатарею T.

Термобатарея (рис. 2) состояла из пяти элементов «константан — железо» (толщина проволок = 0,025 *мм*), которые были укреплены в эбонитовой рамке и закрыты стеклянными пластинками; относительная яркость падающего света измерялась отклонениями гальванометра д'Арсонваля

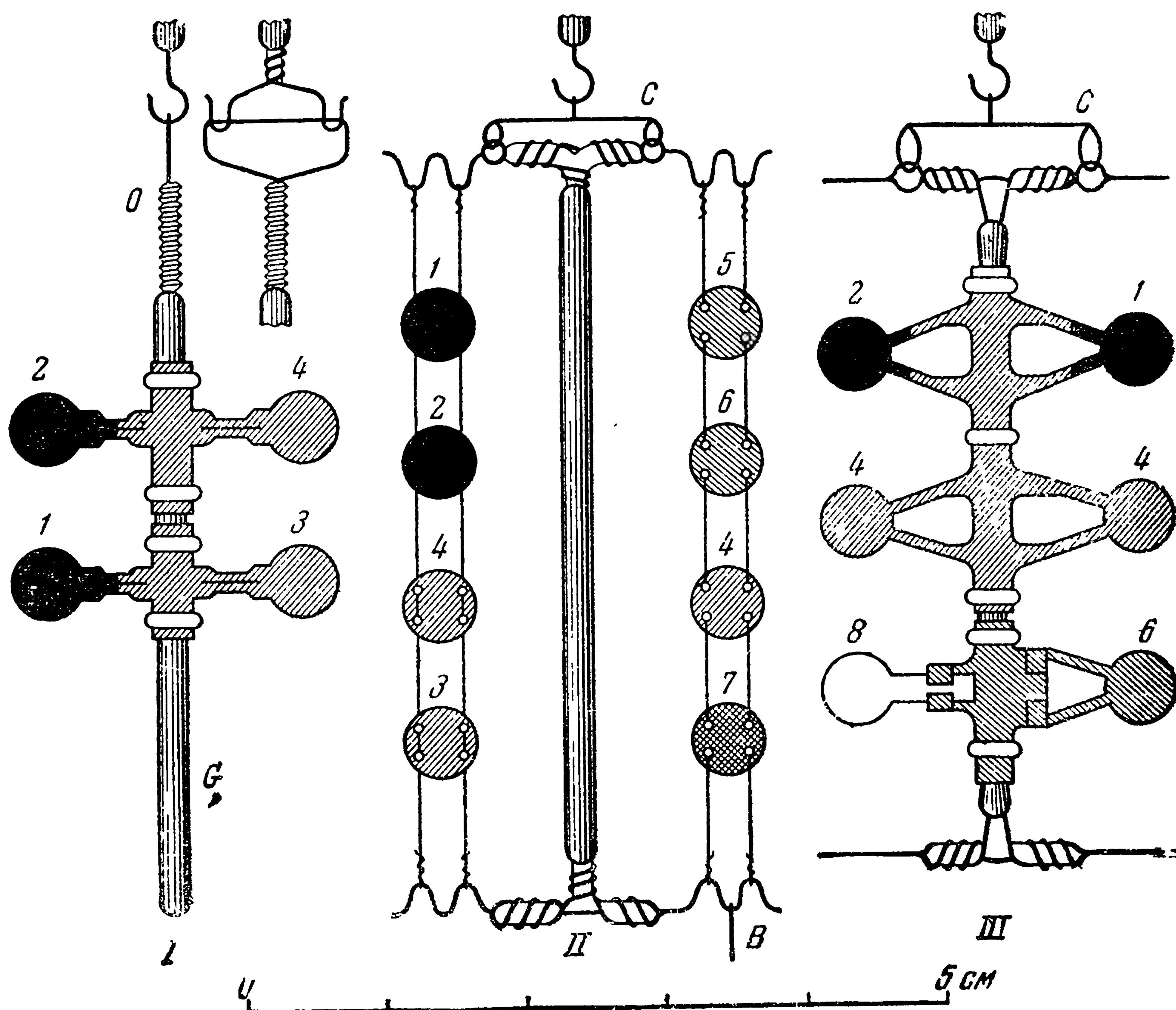


Рис. 3.

[14]. Для того чтобы в одинаковой степени ослабить и пучок лучей, проходящий линзу L_2, здесь была вставлена такая же стеклянная пластинка. Яркость света контролировалась только в том случае, когда двойное зеркало S_1S_4 (см. рис. 1) находилось в указанном положении; при сдвижении двойного зеркала свет не мог падать на термобатарею, и это положение служило для определения нулевой точки гальванометра.

Для опытов служили три различных прибора (см. рис. 3) с разными крылышками.

I прибор (рис. 3, I) состоял из стеклянного стержня, к которому были прижаты платиновыми кольцами (без помощи замазки) два креста из листовой платины различной толщины; для того чтобы крылышки (диаметр = = 5 *мм*) всех приборов сделать равновеликими, их пришлось вырезать стальным штанцем. Два крылышка прибора I имели с обеих сторон зеркальные поверхности, два других были с обеих сторон гальванически покрыты платиновой чернью[1], причем более толстое крылышко подвергалось в пять раз более продолжительному платинированию. Для того чтобы подвешивать прибор к крючку крутильной нити, к стеклянному стержню *G* была припаяна платиновая петля *O*. Петля эта лежала в плоскости, перпендикулярной к плоскости крылышек, чтобы при подвешивании стержень *G* устанавливался в плоскости крылышек совершенно свободно.

II прибор (рис. 3, II) также состоял из стеклянного стержня, к концам которого были припаяны поперечные платиновые проволоки. Между этими держалами были натянуты тонкие (0,05 *мм*) платиновые проволоки, которые проходили через маленькие отверстия в металлических крылышках и удерживали крылышки в вертикальной плоскости; эти проволочки были настолько тонки, что их радиометрическими действиями можно было пренебречь. II прибор был снабжен кардановским подвесом *C* из платиновой проволоки, при помощи которого он и подвешивался к крючку крутильной нити; добавочный платиновый грузик *B* удерживал стеклянный стержень в вертикальном положении.

III прибор был так же построен, как I прибор, с тою разницею, что он был снабжен кардановским подвесом. Узкие металлические полоски (ширина 0,3 *мм*), поддерживающие круглые крылышки, в достаточной мере обеспечивали вертикальное положение последних; слюдяное крылышко (*8*) было вставлено в легкую оправу из алюминия. К стеклянному стержню были приделаны вверху и внизу поперечные проволоки из алюминия, для того чтобы при опускании прибора в баллон крылышки не могли ударяться о стенки стеклянной шейки.

Опыты были проведены со следующими крылышками:

№	Материал				
1.	Платина, платинированная толстым слоем.				
2.	Платина, платинированная в пять раз тоньше.				
3.	Платина	металлическая	(зеркальная поверхность),	толщина	0,10 *мм*
4.	Платина	»	»	»	0,02
5.	Алюминий	»	»	»	0,10
6.	»	»	»	»	0,02
7.	Никель	»	»	»	0,02
8.	Слюда, толщина				0,01

[1] F. Kurlbaum [15]. Wied. Ann., **67**, p. 848, 1899. Полезно при начале платинирования в течение 30 *сек* непрерывно и сильно двигать крылышко в ванне; поверхность крылышка приобретает слабую, серую, как сталь, окраску. После этого губчатая платина, при неподвижной ванне, садится на поверхность крылышка очень прочно.

В качестве крутильной нити служила стеклянная нить (длина 30 *см*), которая на нижнем конце несла плоское зеркало и крючок для подвешивания приборов, а вверху была зажата в железном зажиме (рис. 4) внутри ртутного шлифа[1]; чтобы прикрепить нить без помощи замазки, ее концы

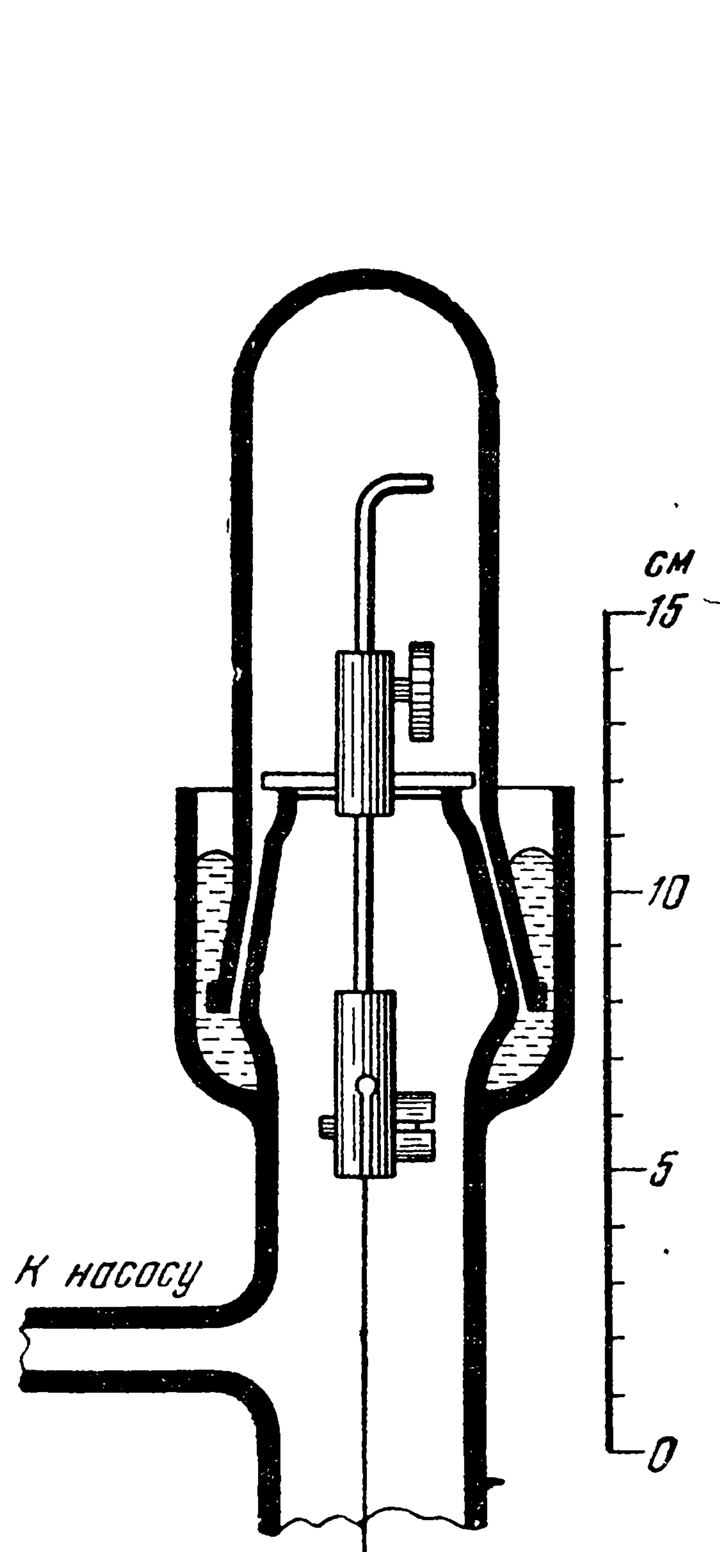


Рис. 4.

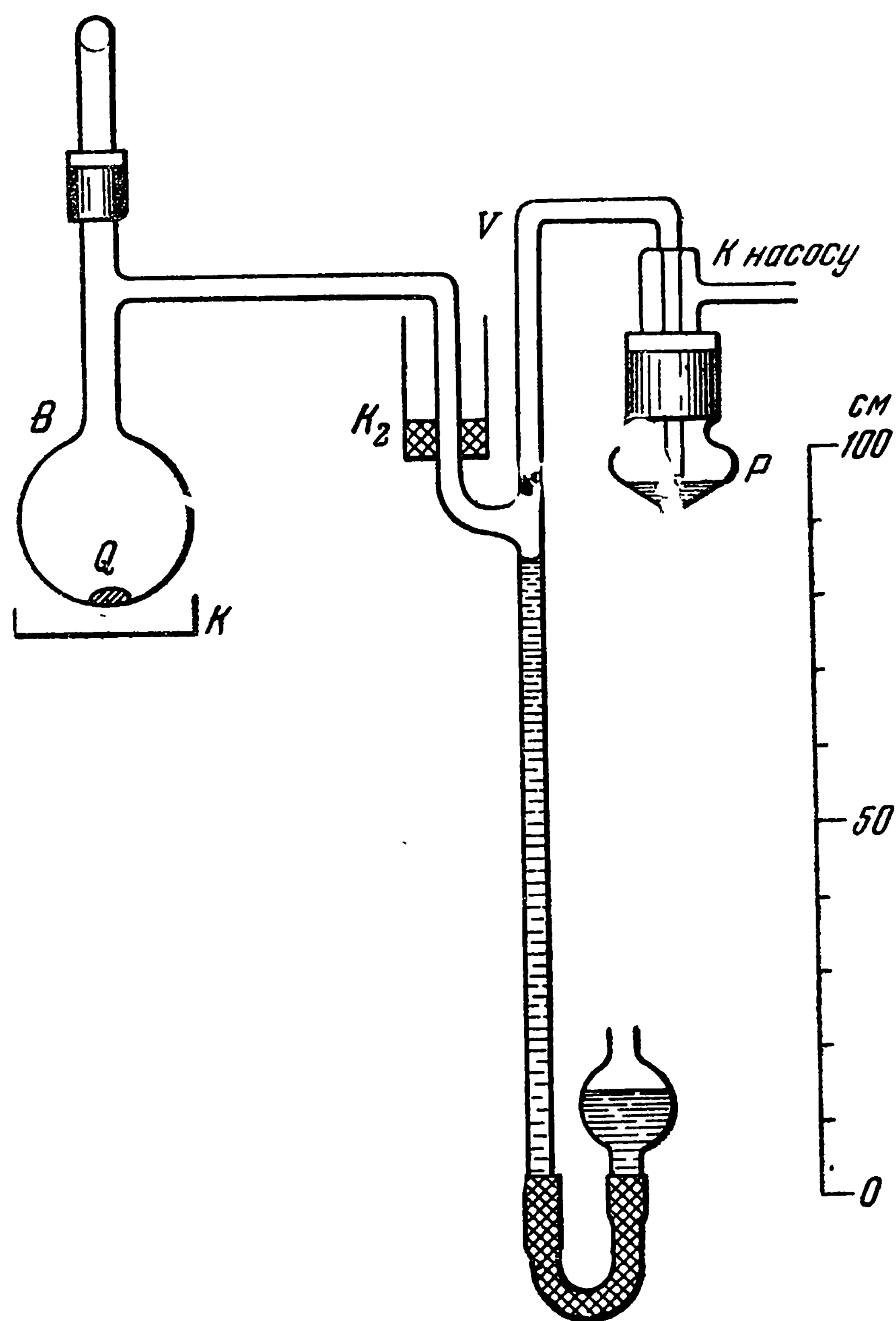


Рис. 5.

были зажаты между кусочками прокаленного асбестового картона, и эти последние внизу прижаты платиновым кольцом к державе зеркала, а вверху схвачены зажимом.

Зеркало помещалось в платинированной алюминиевой оправе; оно было покрыто (при помощи распыления катода в пустоте) слоем металлической платины, так как серебряные зеркала скоро разъедаются ртутными

---

[1] Все стеклянные шлифы, исполненные безукоризненно, были доставлены фирмой Kramer в Фрейбурге (Баден).

парами. При сравнительно слабой отражательной способности подобного зеркала и несовершенстве изображения благодаря двойному прохождению луча через стенки баллона освещение шкалы по Wellmann — Martens'у[1] [16] оказалось замечательно удобным.

При определении величины направляющей силы из колебаний на крючок крутильной нити накладывалась медная проволока в 4,0 *см* длины, масса которой была 0,314 *г*.

Наблюдения были проведены с тремя различными крутильными нитями, направляющие силы которых были так подобраны, что при расстоянии шкалы до зеркала в 1200 делений шкалы двойное отклонение при освещении крылышек с зеркальными поверхностями достигало от 40 до 90 делений шкалы. При этом периоды одного колебания (в одну сторону) описанных выше трех приборов были 15, 35 и 13 *сек*.

Разрежение проводилось автоматическим насосом Kahlbaum'a[2] [17]; измерения давления промером Mc Leod — Kahlbaum'a[3] показали, что легко достигаются разрежения, при которых парциальное давление воздуха меньше 0,0001 *мм* (т. е. меньше одной пятнадцатой части давления насыщенных паров ртути при комнатной температуре).

Для того чтобы получить еще большее разрежение, служил следующий прием (рис. 5): капля ртути Q была помещена на дно стеклянного баллона B, затем воздух разрежался насосом, и ртутная капля нагревалась в водяной бане K_1, на 5° С выше комнатной температуры; испаряясь, ртуть перегоняется в насос и увлекает с собой остатки воздуха из баллона. Если отделить баллон от насоса и осушителя P при помощи барометрического запора V, то в баллоне останутся только ртутные пары; их давление уменьшится до весьма малой величины, если наполнить сосуды K_1 и K_2 холодящей смесью из льда и соли.

Энергия падающих на крылышко лучей измерялась калориметрически: фонарь с зеркалами (см. рис. 1) отодвигался на салазках от баллона настолько, что крылышко прибора могло быть замещено равной ему по величине ($d = 5$ *мм*) диафрагмою D (рис. 6 и 7); все лучи, проходящие через диафрагму, поглощались калориметром. Стеклянная пластинка G компенсировала ослабление света при отражении от стеклянной стенки

---

[1] F. Martens. Wied. Ann., 62, p. 206, 1897; p. 625, 1898. Прибор получен от Schmidt und Haensch; цена около 70 марок. Подобную шкалу я очень рекомендую при работах с чувствительными гальванометрами и малыми зеркалами.

[2] G. Kahlbaum. Wied. Ann., 53, p. 109, 1894. Для избежания паров смазки от крана, который служит для предварительной откачки, между этим краном и насосом был устроен барометрический запор. Очень существенным добавлением, ввиду прочности насоса, служила железная вставка в канал для падающей ртути. Прибор был получен от C. Kramer Freiburg in Br. (Германия). Цена около 350 марок. Основываясь на многолетнем опыте с автоматическими ртутными насосами разных типов, я должен признать насос Кальбаума наиболее совершенным прибором из всех мне известных как по простоте ухода за ними, так и по высоте достигаемого разрежения.

[3] G. Kahlbaum. Zeitsch. für Instrkd., 15, p. 192, 1895.

баллона; она ставилась между диафрагмой и калориметром, чтобы задерживать тепловое излучение диафрагмы.

I калориметр (рис. 6) состоял из куска меди, в котором был просверлен вертикальный канал, наполненный ртутью; в ртути помещался шарик очень маленького калориметрического термометра, деленного на пятые доли градуса; поглощающая поверхность калориметра была закопчена. Вычисленная общая калориметрическая емкость прибора (полагая удельную теплоемкость меди = 0,093) равнялась 3,13 *г* воды.

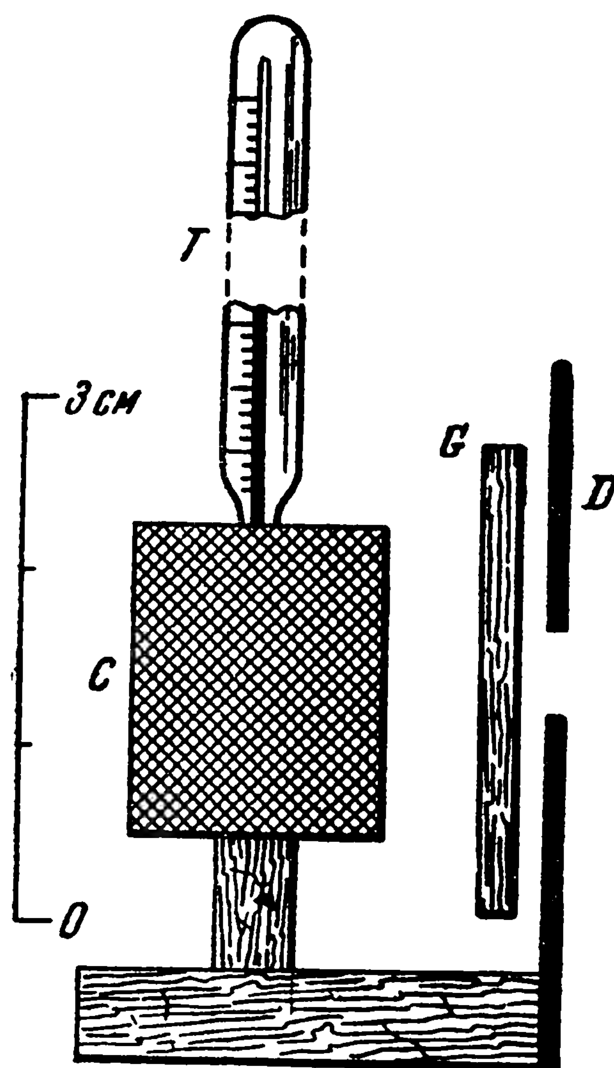


Рис. 6.

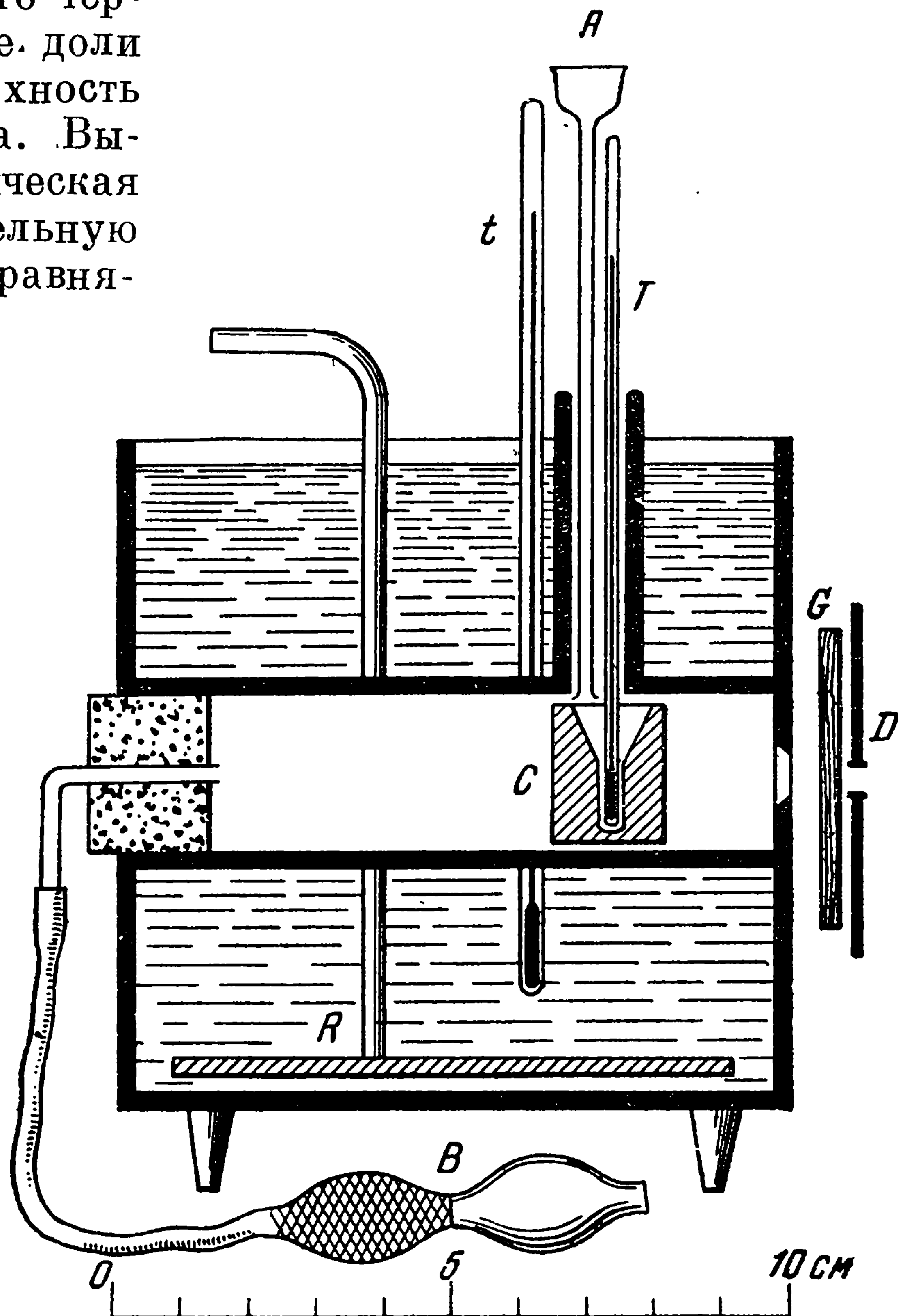


Рис. 7.

II калориметр (рис. 7) представлял собой медный цилиндр, как и в первом калориметре, с общей тепловой емкостью равною 3,61 *г* воды; его поглощающая поверхность была предварительно вызолочена, а потом гальванически покрыта платиновой чернью; этот цилиндр находился в медной трубке, помещенной внутри водяной бани, около 1 *л* в объеме; баня была снабжена мешалкой *R*. Для того чтобы охладить калориметр ниже температуры бани, до начала опыта вводились по стеклянной трубке *A*

несколько капель этилового эфира в коническое углубление калориметра, и затем при помощи резинового меха B прогонялся воздух, который и уносил с собою пары испаряющегося эфира.

Измерения показали, что на диафрагму ($d = 5$ *мм*) падает в минуту от 1,2 до 1,8 *кал*, т. е. что яркость освещения при моих опытах была от двух до трех раз больше энергии солнечных лучей у поверхности земли.

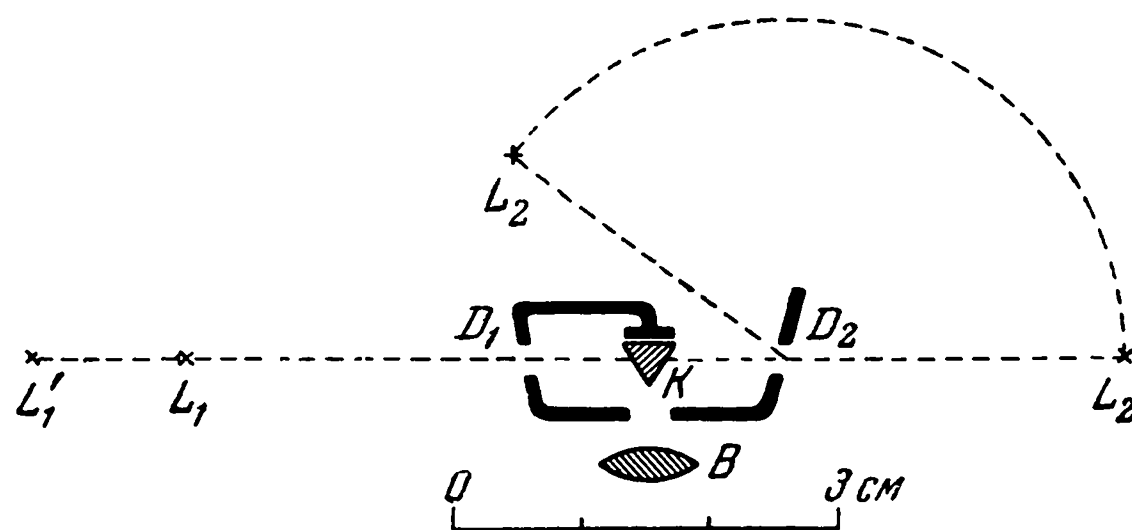


Рис. 8.

Для определения коэффициента отражения исследованных металлов служил фотометр по Ritchie (рис. 8). Свет двух маленьких лампочек накаливания L_1 и L_2 падал, проходя диафрагмы D_1 и D_2 (диаметр 3 *мм*), на маленькую призму K из мела, причем ребро этой последней наблюдалось лупою B. Передвигая лампу L_1, можно было устанавливать одинаковую яркость. Передвигая затем лампу L_2 приблизительно на 130° и придвигая снаружи вплотную к диафрагме D_2 исследуемую металлическую пластинку, можно было снова передвижением лампы L_1 в L_1' установить одинаковую яркость. Для угла падения в 25° коэффициент отражения $\rho = (L_1K : L_1'K)$.

III. ОПЫТЫ

Описанные приспособления позволяют экспериментально решить два основных вопроса:

1) производят ли лучи света какое-либо пондеромоторное действие независимо от известных уже вторичных (конвекционных и радиометрических) сил и

2) соответствуют ли эти новые силы света максвелл-бартолиевым силам давления лучистой энергии.

Перед началом опытов были предварительно изучены основные свойства всего оптического расположения: передвигая добавочный термоэлемент, соединенный с гальванометром д'Арсонваля, вдоль оптической оси линз L_1 и L_2 (см. рис. 8), можно было определить их фокусное расстоя-

ние для наиболее ярких лучей пучка. Затем зеркала и линзы прибора были выверены таким образом, чтобы действительные изображения диафрагмы при ходе лучей как справа, так и слева вполне совпадали.

Для того чтобы сравнить яркости пучков, идущих справа и слева, добавочный термоэлемент был помещен на месте образования действительных изображений диафрагмы и переменно освещался то справа, то слева; из большого числа измерений обыкновенно следовало, что существует некоторая малая разница (около 1%) между яркостями обоих пучков; при большом числе отражающих стеклянных поверхностей такая разница уже вызывается несимметричным сметанием пыли.

При передвижении добавочного термоэлемента на $\pm 0{,}5$ из его главного положения в направлении оси пучка в пределах, в которых могут колебаться установки пучка на крылышко, наблюдается уменьшение яркости для обоих направлений освещения на 5%.

Эти предварительные испытания совершенно необходимы.

Приборы с крылышками были всегда так помещены внутри баллона, чтобы лучи источника, проходящие мимо крылышка, отраженные и снова собранные вогнутой стенкой баллона, не падали на части подвешенного прибора.

После того как прибор с крылышками бывал помещен в баллон, начиналось откачивание, продолжавшееся несколько дней, причем последние откачивания проводились при подогревании стенок баллона и при одновременном освещении отдельных крылышек светом дуги. Перед каждой серией наблюдений нижняя часть баллона, где находилась капля ртути, нагревалась в водяной бане на 5° выше комнатной температуры [1], затем в течение от одного до двух часов снова проводилось откачивание, после чего барометрический запор V поднимался и следовало охлаждение строганым льдом и солью.

Самой существенной помехой при производстве измерений являются конвекционные токи; они сказываются в непрерывном «ходе» нуля, причем как быстрота, так и направление этого хода зависят от случайных условий (даже для одного и того же крылышка в разные дни наблюдений).

В течение одной серии наблюдений указанный «ход» нуля бывает обыкновенно настолько незначителен, что, увеличивая число отдельных наблюдений, его легко было исключить. Эта конвекция остатков ртутных паров обусловливается нагреванием освещаемого крылышка, а также случайным внешним неравномерным нагреванием стенок баллона и в особенности неизбежной разницей температур двух охлаждаемых ртутных поверхностей. При наблюдениях без охлаждения колебания, обусловленные конвекцией, сказываются гораздо резче, чем при охлаждении льдом с солью; при более высоких давлениях воздуха наблюдения делаются благодаря

[1] При указанной малой разнице температур ртуть не осаждается на более холодные стенки прибора; это явление, имеющее место при несмачиваемых поверхностях, было указано M. Cantor [18] (Wied. Ann., **56**, p. 493, 1895).

конвекции настолько затруднительными, что измерения представляются едва возможными.

Другая причина, вызывающая колебание отсчетов,— это непостоянство вольтовой дуги, которое сказывается и при самых лучших углях [1]. Скачки в яркости дуги сказываются в изменениях (увеличении или уменьшении) отдельных амплитуд колебаний прибора; их возможно исключить только с увеличением числа отдельных наблюдений.

При помощи двух труб наблюдатель мог попеременно отсчитывать отклонения прибора с крылышками и гальванометра; помощник [2], наблюдавший за правильным горением дуги, по команде перемещал двойное зеркало S_1S_4 (рис. 1). Замыкая освещение с периодическими перерывами, можно довести амплитуду колебаний прибора до нужной величины.

Табл. 1 дает начало одного из протоколов наблюдений.

В этой таблице обозначают:

L_1 и L_2 — точки поворота на шкале, когда свет падал на крылышко прибора от линзы L_1 или от линзы L_2. Средний ряд, «выч», дает вычисленное (из трех прилегающих точек поворота) положение равновесия. «Отклонение» обозначает отклонение системы при изменении направления освещения.

G_1 и G_2 дают положения гальванометра в первом и во втором случае (в последнем — нулевую точку его).

«Гальванометр» — отклонения гальванометра.

«Отклонение приведенное ($G = 100$)» дают вышеобозначенные отклонения прибора, приведенные к постоянному отклонению гальванометра в 100 делений шкалы.

Указанным в табл. 1 способом проводилось по семи рядовых отсчетов для L_1 и L_2 и из «Отклонений приведенных ($G = 100$)» выводилось среднее с обозначением средних $\pm$ отступлений отдельных наблюдений. (Для крылышка табл. 1 это двойное отклонение $a = 29{,}4 \pm 1{,}6$ дел. шкалы).

Для того чтобы сравнивать наблюдения, сделанные с различными крылышками, необходимы еще следующие поправки.

В приборе I и III узкая полоска света падает, помимо самого кружка, и на части, его поддерживающие, благодаря чему отклонение увеличивается; измеряя площади освещенных частей и их расстояние от оси вращения, мы можем вычесть то добавочное действие, которое они производят (от 5 до 10% всей величины), и получаем то отклонение, которое обусловлено одним кружком крылышка. (II прибор свободен от этой поправки). Для крылышка табл. 1 эта поправка составляет 1,9 делений шкалы; вычисленное двойное отклонение составляет 27,5 делений шкалы.

---

[1] Вполне удовлетворительными оказались угли «А» Сименса: при более дешевых углях наблюдения едва ли возможны.

[2] Моим помощником при этих опытах был помощник препаратора при кабинете Автоном Федоров; его добросовестное отношение и ловкое обращение с приборами в значительной мере облегчили мне эти нелегкие наблюдения.

Таблица 1

III прибор. Платинированное крылышко (2). Расстояние центра кружка от оси вращения 9,2 *мм*

Охлаждение льдом с солью

Расстояние до шкалы $A = 1195$ дел. шкалы

L_1			L_2			L_1			L_2			L_1
	выч.			выч.			выч.			выч.		
		306	115					307	174			—
176	240			206	295	184	245			210	244	—
	239	302	118	207			244	303	177	211		—
177	239			208	296	184	243			212	245	—
	240	302	124	209			243	300	180	213		—
178					294	189					247	—
	240			208			244			212		

Отклонение:	32 дел. шкалы	36 дел. шкалы	32 дел. шкалы
G_1	G_2	G_1	G_1
308	201	314	
305	201	312	201
312		314	
314		**316**	
310		314	

Гальванометр: 109 дел. шкалы	113 дел. шкалы	113 дел. шкалы
Отклонение приведенное ($G = 100$) 29,3 дел. шкалы	31,8 дел. шкалы	28,2 дел. шкалы

Измерение расстояния центра кружка крылышка от оси вращения проводилось следующим способом: дуговой фонарь с зеркальным прибором отодвигался на салазках в сторону и со стороны падающих во время опыта лучей вешался возможно близко к баллону отвес из тонкой блестящей се-

ребряной проволоки; зрительная труба с окулярным микрометром располагалась перпендикулярно к плоскости дисков на расстоянии около 4 *м*, и надо было перемещать отвес до тех пор, покуда он не покрывал собою крутильную нить. Величина, соответствующая одному делению окулярного микрометра трубы, определялась при помощи визирования масштаба, расположенного поблизости от баллона; кажущееся расстояние центра кружка крылышка от отвеса давало истинное расстояние первого от оси кручения и могло быть измерено с точностью до $\pm 0{,}5$ *мм*; измеряемые расстояния лежали между 9 и 11 *мм*.

На основании этих измерений наблюденные двойные отклонения были приведены к отклонениям, соответствующим расстоянию центров кружков от оси вращения, равному 1 *см*. Для крылышка табл. 1 такое приведенное отклонение равно 29,9 делений шкалы.

Для того чтобы определить абсолютную величину давления света на крылышко, необходимо было измерить в абсолютной мере величину направляющей силы крутильной нити. Вместо прибора с крылышками к крючку крутильной нити подвешивалось тело (медный цилиндр) с известным моментом инерции, и из трех серий наблюдений, из которых каждая состояла из десяти простых качаний, выводилось среднее время одного качания (табл. 2)[1].

Таблица 2

Время простого качания, *сек*		
Одно зеркало	$\frac{t_1}{2} = 5{,}1 \pm 0{,}05$	Медный цилиндр
Зеркало + медный цилиндр	$\frac{t_1}{2} = 29{,}4 \pm 0{,}1$	Длина = 4,0 *см*
Направляющая сила $D = 0{,}00494$ *дин·см.*		Масса = 0,314 *г*

На основании указанной величины направляющей силы мы получаем для крылышка табл. 1 при одностороннем освещении величину давления света в *динах*:

$$p = 0{,}000\,030\,8 \pm 0{,}000\,001\,7.$$

Для того чтобы проверить расчеты Maxwell'a и Bartoli, необходимо вычислить ту величину светового давления, которую следует ожидать при опытах согласно упомянутой теории, и сравнить вычисленную величину с наблюденной. Для этого необходимо сделать калориметрическое изме-

[1] Ср. F. Kohlrausch [2] Lehrbuch der praktischen Physik, § 29 и прим. 11 и 12, Teubner, Leipzig, 1901.

рение падающей световой энергии, а также фотометрическое измерение коэффициентов отражения крылышек.

Измерения с помощью первого калориметра (см. рис. 6) проводились следующим образом: зеркала (рис. 1) отводились по салазкам в сторону настолько, что на место приборов с крылышками можно было поставить диафрагму калориметра D. Затем калориметр освещался в течение 5 *мин* и через каждую минуту наблюдались показания термометра (а также и гальванометра). После этого посредством непрозрачного экрана освещение прерывалось, и в следующие 5 *мин* снова через каждую минуту наблюдались показания термометра, которые теперь постоянно уменьшались, и нулевая точка гальванометра. Полный ряд наблюдений заключал в себе пять последовательных периодов освещения.

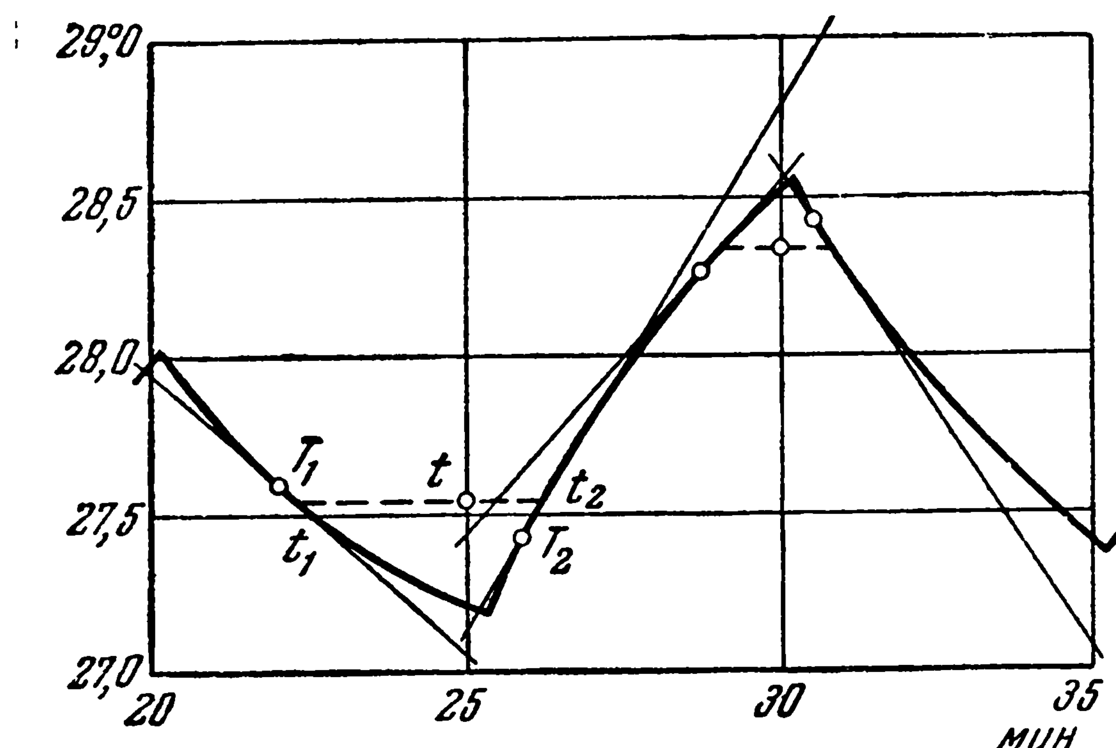


Рис. 9.

Все наблюдения обрабатывались графически, для чего показания термометра наносились на координатную бумагу и соединялись непрерывной кривой так, чтобы последняя протекала возможно гладко (рис. 9). Из рисунка ясно, что ход температуры уже через 10 *сек* обнаруживает особой точкой поворота переход от освещения к затемнению или обратно.

Очень большая скорость охлаждения калориметра влечет за собой необходимость особой обработки результатов, так как даже в течение одного интервала наблюдения ни скорость нагревания, ни скорость охлаждения не представляют из себя постоянной величины. Для определенной средней температуры поверхности калориметра обе скорости имеют постоянные значения, представляемые касательными (последние легко наносятся на чертеже). Для всех постоянных величин точки пересечения касательных с ограничивающими интервал ординатами дают те разности температур, которые установились бы в 5 *мин*, если бы обе скорости были постоянны; сумма двух разностей дает общее, поправленное на потери повышение температуры калориметра.

Но здесь выступает один источник ошибок при определении истинной средней температуры поверхности: термометр не успевает следовать за температурой и дает при освещении слишком низкие, а при охлаждении слишком высокие показания. То обстоятельство, что термометр обнаруживает точку поворота через 10 *сек*, позволяет в виде первого и для наших

опытов достаточного приближения допустить, что термометр отстает на 20 *сек*. Тогда для средней температуры нужно сравнивать не точки кривой t_1 и t_2, но точки T_1 и T_2, лежащие на той же кривой на 20 *сек* раньше.

Такие графические определения были проделаны при каждом нагревании для двух температур; табл. 3 представляет один ряд измерения.

Таблица 3

Калориметр I. Водяной эквивалент 3,13 *г*

	Скорость нагревания	Скорость охлаждения	Общее нагревание	Отклонение гальванометра	Приведенное общее нагревание ($G = 100$)
I	1°,57	0°,63	2°,30	140	1°,64
	1,49	0,80	2,29	128	1,79
II	1,44	0,85	2,29	128	1.79
	1,31	1,10	2,40	122	1,97
III	1,38	1,08	2,46	129	1,91
	1,00	1,37	2,37	126	1,88
IV	1,30	1,15	2,45	123	1,99
	1,04	1,45	2,49	127	1,96
V	1,26	1,27	2,54	129	1,97
	0,93	1,50	2,43	126	1,93

Общее нагревание за 5 *мин* ($G = 100$) 1°88±0,09

Со вторым калориметром (см. рис. 7) измерения были гораздо проще: калориметр охлаждался (на 2,5° ниже температуры бани) при помощи этилового эфира, затем подвергался нагреванию лучами и наблюдатель через каждую минуту отсчитывал показание калориметрического термометра (а в промежутки отклонение гальванометра и температуру водяной бани). Наблюдения наносились графически, соединялись сплошной кривой, на этой кривой отмечалась температура бани [1], и в этой точке проводилась касательная к кривой, соответствующая истинной скорости нагревания калориметра независимо от потерь через лучеиспускание; если взять две точки кривой, соответствующие времени в 2,5 *мин* до и после наступления равенства температур, то мы также получим среднюю скорость нагревания калориметра в течение 5 *мин*. Табл. 4 дает результаты наблюдений [2].

[1] Надо опять иметь при этом в виду, что калориметрический термометр отстает от истинной температуры калориметра на 20 *сек*.

[2] Результаты табл. 3 и 4 не могут служить для непосредственного сравнения, так как они относятся к различным регулировкам термобатареи.

Таблица 4

Калориметр II. Общая калориметрическая емкость 3,61 *г* воды

Ряды наблюдений	Нагревание в течение 5 *мин*		Среднее	Отклонения гальванометра, дел. шкалы	Нагревание, приведенное к $G = 100$, дел. шкалы
	Из касательной	Из разниц температур			
I	2°,40	2°,41	2°,40	159	1°,51
II	2,55	2,57	2,57	163	1,57
III	2,43	2,50	2,46	158	1,56

Среднее нагревание (для $G = 100$) = 1°,55±0,02.

Отсюда получаем количество падающей в течение секунды энергии.

$$E = \frac{1°,55 \cdot 3{,}61 \cdot 4{,}18 \cdot 10}{300} = 7{,}74 \cdot 10^5 \text{ эрг}.$$

При наших опытах лучи падали не параллельным, а сходящимся пучком; их наклон был, однако, так незначителен, что обусловленная им поправка[1] (около 1%) могла быть опущена ввиду других гораздо больших неточностей наблюдений. Мы можем, следовательно, проводить вычисления по формулам, данным Максвеллом и Бартоли для пучка параллельных лучей.

Для абсолютно черного тела мы получаем на основании калориметрических измерений табл. 4 величину давления (p):

$$p = \frac{E \text{ эрг}}{3 \cdot 10} = 0{,}000\,0258 \text{ дин}.$$

Для того чтобы полученные результаты выразить в удобно сравниваемых величинах, мы возьмем за единицу сравнения величину максвелл-бартолиева давления на абсолютно черное тело, вычисленную из калориметрических наблюдений, и назовем эту произвольную единицу «единицею МБ».

В этих единицах результаты табл. 1 выразятся таким образом:

$$p = \frac{0{,}000\,030\,8 \pm 0{,}000\,001\,7}{0{,}000\,025{,}8} (1{,}19 \pm 0{,}07) \text{ мбар}.$$

Непосредственное измерение коэффициентов отражения исследованных крылышек являлось невозможным, потому что их поверхности оказались слишком неровными. Поэтому я определил при помощи фотометра (см. рис. 8) коэффициенты отражения тех металлических листов, из которых

[1] L. Boltzmann. Wied. Ann., 22, p. 292, 1884, а также Д. А. Гольдгаммер, l. c. p. 844.

были сделаны крылышки; у этих листов также сказывались в значительной степени неровности и, кроме того, ясно выраженная окраска отраженного света (особенно у никеля); величины этих коэффициентов отражения, измеренных для угла падения в 25°, приведены в табл. 5 без дальнейших приведений. Для сравнения тут же указаны коэффициенты отражения при нормальном падении лучей ($\lambda = 600\ \mu\mu$), по Hagen'у [19] и Rybens'у [2] [1], и на их основании вычислены максвелл-бартолиевы силы (числа, полученные для магналиума, приведены для алюминия).

Таблица 5

Вещество	Фотометрические измерения		По Hagen и Rubens	
	ρ	*p*, *мбар*	ρ	*p*, *мбар*
Платина	0,5 ±0,05	1,5	0,64	1,64
Алюминий	0,6 ±0,05	1,6	0,83	1,83
Никель	0,35±0,05	1,4	0,65	1,65

Для слюды я не привожу вычислений, так как наблюдения были сделаны только с одним крылышком, и нет проверочных измерений с более толстыми крылышками.

Ниже изложены результаты отдельных рядов наблюдений, сделанных мною при помощи разных приборов. Когда я перешел от наблюдений при комнатной температуре, при которой неизбежные колебания окончательных результатов довольно значительны, к измерениям при охлаждении льдом с солью, я не ожидал получить такого согласия между наблюденными величинами и вычисленными по Максвеллу — Бартоли, которое вытекало из моих опытов; я поэтому предположил, что такое совпадение вычислений и наблюдений надо приписать случайности, и поэтому сперва заменил I калориметр II-м калориметром, а затем и II прибор с крылышками III-м прибором.

Многочисленные наблюдения, которые я делал с I прибором при комнатной температуре, значительно уступают последующим измерениям, а поэтому и не приведены мною. Не приведены также наблюдения с платинированным крылышком (2) II прибора, так как при последовавшем за опытами микроскопическом исследовании крылышка выяснилось, что платиновая чернь осела неудовлетворительно в виде губки (чего на других крылышках не наблюдалось). С III прибором были, к сожалению, сделаны только два ряда наблюдений, так как дальнейшие опыты были прерваны поломкой аппарата.

[1] H. Hagen und H. Rubens. Ann. d. Phys., 1, p. 373, 1900.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты опытов приведены в единицах *мбар*; под каждой наблюденной величиной приведено в тех же единицах и среднее колебание в установках приборов, причем все колебания, меньшие чем 0,15 *мбар*, обозначены 0,1 *мбар*, ниже 0,25 *мбар* обозначены 0,2 *мбар* и т. д.

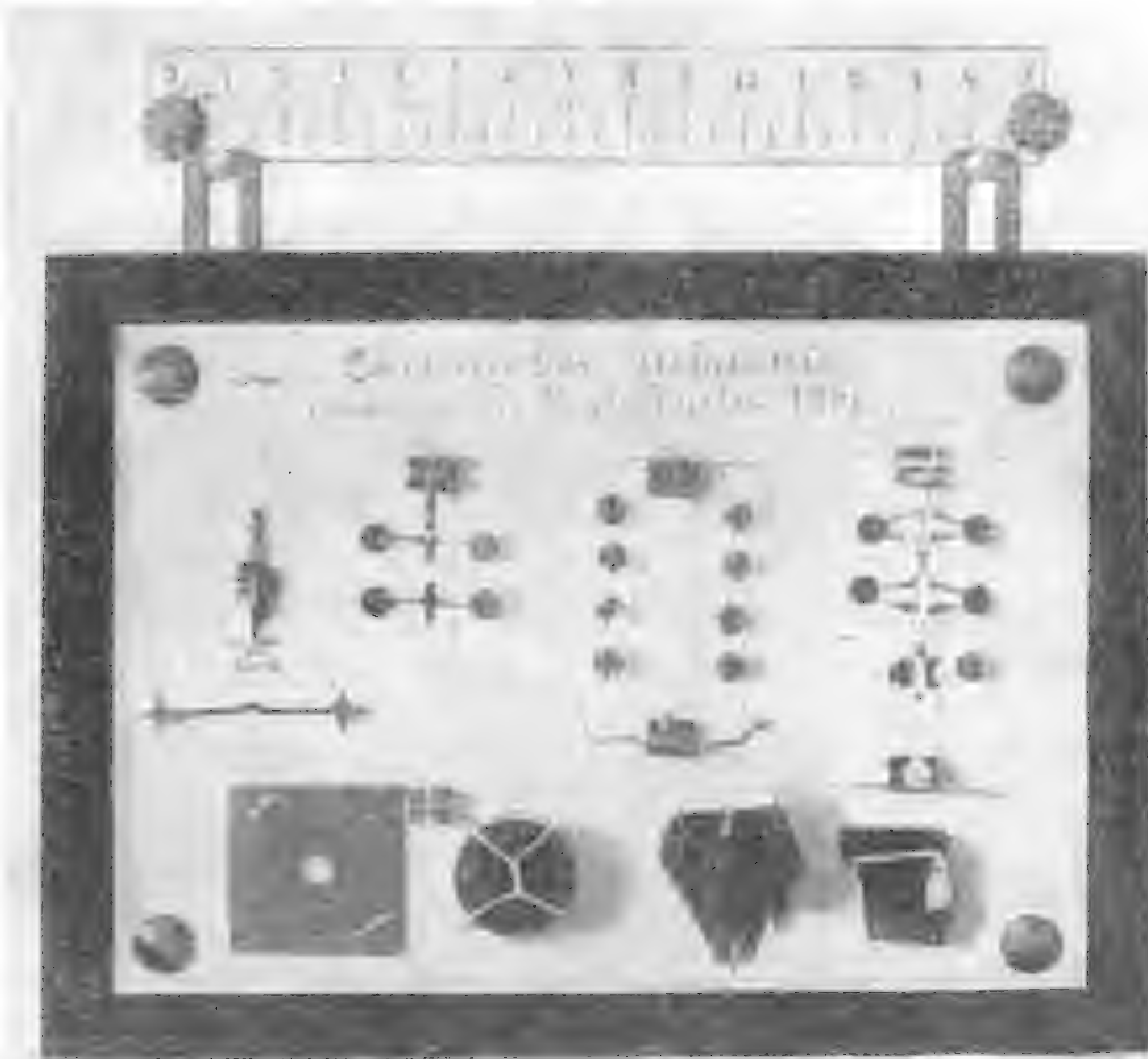


Рис. 10. Приборы П. Н. Лебедева, служившие для опытов по световому давлению

Для того чтобы составить представление о точности приведенных измерений, могут служить следующие соображения: колебания при установках прибора во время измерений приведены в табл. 1; определение абсолютной величины давящей силы света (куда входят измерения направляющей силы крутящей нити, расстояния от зеркала до шкалы и расстояния центра крылышка до оси вращения) возможно было сделать

Таблица 6

		I прибор	II прибор							III прибор	
			I калориметр			II калориметр					
			белый свет			белый свет	красный свет	белый свет	синий свет	белый свет	
1	Толстоплатинированные крылышки	1,8 ±0,2	1,6 ±0,1	1,5 ±0,1	—	—	—	—	—	1,5 ±0,1	1,4 ±0,1
2	Тонкоплатинированные крылышки	1,3 ±0,2	—	—	—	—	—	—	—	1,2 ±0,1	1,1 ±0,1
	Вычислено	1,2	—	—	—	—	—	—	—	1,1	1,0
3	Платина толстая	—	1,8 ±0,1	—	—	—	—	—	—	—	—
4	Платина тонкая	—	2,0 ±0,1	1,9 ±0,2	1,8 ±0,1	1,9 ±0,1	(1,8 ±0,8)	1,7 ±0,1	(1,5 ±0,5)	1,7 ±0,2	2,0 ±0,1
5	Алюминий толстый	—	—	2,3 ±0,4	1,9 ±0,1	—	—	—	—	—	—
6	Алюминий тонкий	—	—	2,0 ±0,1	2,3 ±0,1	2,0 ±0,2	(2,9 ±0,8)	2,1 ±0,1	(2,5 ±0,5)	1,4 ±0,2	1,7 ±0,1
7	Никель тонкий	—	—	1,7 ±0,3	1,2 ±0,2	1,4 ±0,1	(2,3 ±0,5)	1,4 ±0,2	(2,7 ±0,9)	—	—
8	Слюда	—	—	—	—	—	—	—	—	0,08 ±0,05	0,13 ±0,03

с точностью около $\pm 8\%$; вычисление абсолютной величины единицы *мбар* из калориметрических измерений (куда входят общая водяная емкость, повышение температуры калориметра и близкое к единице отношение площади диафрагмы к площади круга крылышка) возможно было сделать с вероятной точностью в $\pm 7\%$; неточности в определении истинной величины коэффициентов отражения, вероятно, не превосходят $\pm 10\%$.

Указанным неточностям отдельных измерений суперпонируются случайные неточности установки середины действительного изображения диафрагмы на крылышко и возможность, что излучение нагреваемого светом крылышка отражалось от вогнутой поверхности баллона и падало на другие части подвешенного прибора, причем место этого побочного нагревания изменялось в течение одного колебания прибора. Общая случайная ошибка, возможная при описанных измерениях с белым светом, вероятно, не превышает $\pm 20\%$.

При опытах с красным и синим светом, при которых количество падающей энергии в пять раз меньше, случайные колебания, обусловленные конвекцией, те же, и потому точность полученных результатов соответственно меньше; то же самое надо заметить и относительно очень малых отклонений (едва достигающих 4 дел. шкалы) при слюдяном крылышке. Эти опыты, которые были предприняты в виде проверочных, все же позволяют утверждать, что в этих случаях не появляется новых пондеромоторных сил, которые по величине были бы сравнимы с максвелл-бартолиевыми силами.

Кроме того, я многократно проводил сравнительные измерения над тонкими и толстыми металлическими (зеркальными) платиновыми и алюминиевыми крылышками; мне, однако, не удалось обнаружить достаточно ясно выраженной радиометрической разницы; вот почему в пределах погрешностей наблюдений можно считать радиометрические силы тонких металлических крылышек равными нулю.

Полученные результаты можно формулировать таким образом:

1) падающий пучок света производит давление как на поглощающие, так и на отражающие поверхности; эти пондеромоторные силы не связаны с уже известными вторичными конвекционными и радиометрическими силами, вызываемыми нагреванием;

2) силы давления света прямо пропорциональны энергии падающего света и не зависят от цвета;

3) наблюденные силы давления света, в пределах погрешностей наблюдений, количественно равны максвелл-бартолиевым силам давления лучистой энергии.

Таким образом, существование максвелл-бартолиевых сил давления опытным путем установлено для лучей света.

Физическая лаборатория университета.
Москва. Август 1901.

19. ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЫ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

*(Fortschr. d. Phys., **57** (II). p. 5, 1901)*

По методу, о котором сообщалось ранее (эти Ber., **56** (2), стр. 5—6, 1900), и с учетом ряда экспериментальных деталей, автор исследует пондеромоторные силы, с которыми белый, красный и голубой свет действует на поглощающие, покрытые платиновой чернью и отражающие (алюминий, платина, никель и слюда) крылья в высоком вакууме.

Опыты были проведены с тремя различными приборами и с двумя различными калориметрами; они были разбиты на десять независимых групп, и их результаты сводятся к следующему.

1. Падающий пучок световых лучей оказывает давление как на поглощающее, так и на отражающее тело; это пондеромоторное действие не зависит ни от известных вторичных круксовых сил, вызываемых нагреванием, ни от явлений конвекции.

2. Эти силы светового давления прямо пропорциональны падающему количеству энергии и не зависят от цвета световых лучей.

3. Эти силы светового давления в пределах ошибок наблюдений количественно дают полное совпадение с пондеромоторными силами излучения, вычисленными Максвеллом и Бартоли.

Таким образом, существование сил давления световых лучей, предсказанных Максвеллом и Бартоли, доказано экспериментально.

20. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ЭФИРЕ

Исследователь электромагнитных колебаний располагает в настоящее время очень большим интервалом волн, и, может быть, не лишнее составить таблицу таких колебаний, которыми мы в настоящее время можем пользоваться для исследования весомой материи (диэлектрических постоянных, скоростей распространения, коэффициентов поглощения и т. д.).

Скорость распространения электромагнитных возмущений в пустоте (а также с очень большим приближением и в воздухе), как то показывают опыты, есть величина постоянная, не зависящая от периода колебаний и равная скорости распространения света, что составляет 300 000 *км/сек.*

Между периодом одного колебания τ и длиною волны λ существует простое соотношение

$$\frac{\lambda}{\tau} = v = 300\,000 \ \textit{км/сек}.$$

Когда задан период колебания, мы можем вычислить, какова была бы длина соответствующей волны, свободно распространяющейся в эфире, и, наоборот, измеряя длину волны, мы можем вычислить период ее колебания.

По способу возбуждения этих колебаний мы можем их разделить на несколько классов: принужденные колебания, получаемые от магнитно-электрических машин, и свободные колебания заряженных систем (мы рассмотрим преимущественно искровой заряд); ими исчерпываются способы получения колебаний произвольной длины волны. Далее следуют излучение тел (Luminescenz), во-первых, под влиянием тепла — термическое лучеиспускание (Thermoluminescenz),— а потом лучеиспускание от других причин (электрических разрядов, фосфоресценция и т. д.).

Вскоре после того, как Фарадей (1832) открыл явления индукции, конструктором физических приборов Пикси (Pixii, 1837) была построена магнитноэлектрическая машина — прибор для получения принужденных

электрических колебаний: эта первая магнитоэлектрическая машина при возможно быстром вращении давала 20 полных перемен тока, т. е. имела период $\tau = 0{,}05$ *сек*, чему соответствовала длина волны $\lambda =$ $= 15\,000$ *км*.

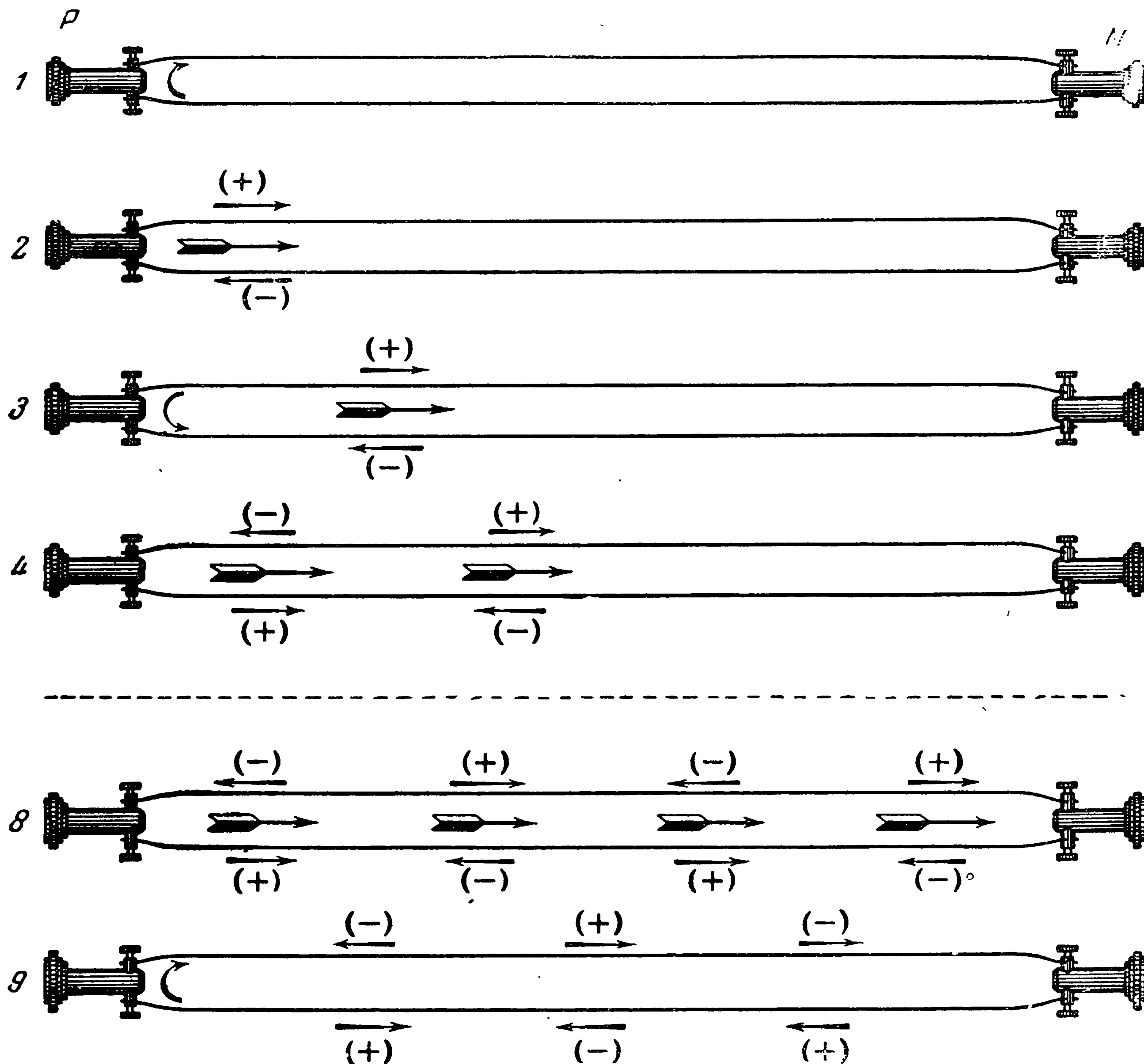


Рис. 1.

Современная электротехника выработала тип альтернаторов с периодом в $\tau = 0{,}02$ *сек* (что соответствует длине волны в 6000 *км*).

Обыкновенный телефон мы можем рассматривать также как магнитноэлектрическую машину, период которой обусловливается периодом падающего на нее звука. Телефон еще очень отчетливо передает звуки,

период которых $\tau = 0,001$ и выше (длина соответствующей электромагнитной волны $\lambda = 300$ *км* и меньше); на телефонной линии Петербург — Москва укладываются две таких волны: мы имеем здесь случай, когда в замкнутом металлическом проводнике (рис. 1) одновременно существуют электрические токи, имеющие разное направление (в нашем случае для $\lambda = 300$ *км* = четыре участка, см. *8* и *9*). Чтобы легче разобраться, на рис. 1, явление представлено с первого момента возникновения колебаний в телефоне P (*1*) до установившегося состояния (*8*) и (*9*): заряды (+) и (—) двигаются в одном направлении — по направлению разговора (т. е. от Петербурга к Москве или обратно), причем они перемещаются со скоростью света [1]. За «направление электрического тока» принято считать направление движения (+) заряда, а потому движение (—) заряда в том же направлении соответствует (например, по своему действию на магнитную стрелку) «току» в противоположном направлении, что и указано стрелками (→).

Для получения еще более быстрых колебаний Юинг [1] (Ewing, 1891) построил динамомашину с очень большим числом полюсов на окружности и для получения возможно большого числа оборотов в секунду соединил ее с паровою турбиною: его машине давала период $\tau = 0,0001$ *сек* (что соответствует $\lambda = 30$ *км*). Тесла [2] (Tesla) построил альтернатор с еще меньшим периодом $\tau = 0,000\,05$ *сек* ($\lambda = 15$ *км*). Эти две машины мы покуда можем рассматривать как предел, с которым приходится считаться современной машиностроительной технике [3].

К типу приборов, дающих принужденные колебания, мы можем еще причислить и вращающийся коммутатор Физо, который произвольное число раз в секунду может посылать ток от гальванической батареи в том или в другом направлении. Предел числа перемен в секунду обусловливается теми же (даже несколько меньшими) техническими трудностями, что и в конструкции альтернатора.

Несравненно более широкий интервал электромагнитных колебаний дают свободные колебания разряжающейся системы проводников. На возможность явления электромагнитных колебаний при разряде конденсатора через проводник с известною самоиндукцией впервые указал Гельмгольц [4] (1847). В. Томсон (ныне лорд Кельвин) дал полную теорию явления (1853 г.): он нашел, что для проводников с малым гальваническим сопротивлением период колебания $\tau = k\sqrt{CL}$, где k есть постоянный коэффициент, C — емкость конденсатора, а L — самоиндукция замыкающего проводника. Действительное существование электрических колебаний при искровом разряде конденсатора впервые обнаружил Феддерсен [5] (Feddersen, 1861), наблюдая искру при помощи вращающегося зеркала: изменяя число банок лейденской батареи и величину самоиндукции за-

---

[1] Звуковая волна, распространяясь по говорной трубке, приходила бы из Петербурга в Москву только через полчаса, и вести разговор при этих обстоятельствах было бы более чем неудобно, тогда как при телефоне электромагнитная волна запаздывает лишь на неуловимые для нашего уха две тысячные доли секунды.

мыкающего проводника, он мог наблюдать периоды колебаний от $\tau_1 = 0{,}000\ 80$ до $\tau_2 = 0{,}000\ 002$ *сек* (что соответствует волнам от $\lambda_1 = 24$ до $\lambda_2 = 0{,}6$ *км*).

Схема расположения опыта Феддерсена показана на рис. 2: батарея C разряжается через соленоид L; свет от появляющейся при разряде искры F падает на вращающееся вогнутое зеркало S, которое дает действительное изображение искры на фотографической пластинке P: при вращении

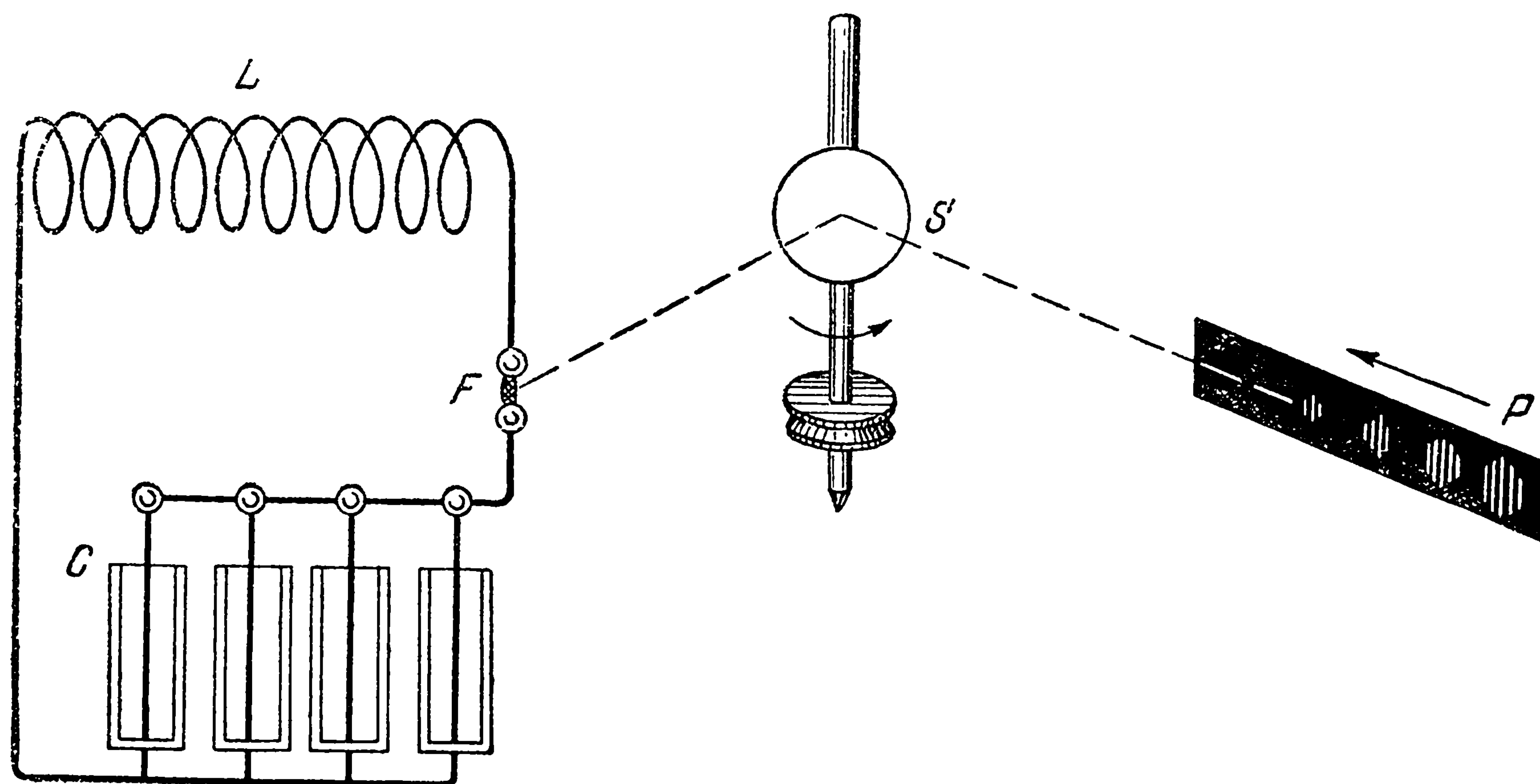


Рис. 2.

зеркала изображение искры перемещается по пластинке P и дает не сплошной след, а ряд отдельных изображений, соответственно числу перемен направления тока в цепи. Зная расстояние пластинки от зеркала, а также число его оборотов в секунду и измеряя расстояние изображений, легко определить период колебания [1]. Фотография показывает, что подобная система совершает 15—20 заметных колебаний с постепенно убывающей амплитудой.

Изменяя емкость и самоиндукцию, мы можем получать системы с любым периодом колебания: так Лодж [4] (Lodge, 1888), разряжая очень большую батарею через соленоид с весьма большим числом оборотов проволоки, получал искру, дававшую музыкальный звук; период колебания системы был $\tau = 0{,}002$ *сек* (что соответствует $\lambda = 600$ *км*). Уменьшая самоиндукцию цепи и емкость конденсатора, мы получаем колебания

---

[1] Чтобы два изображения, следующие друг за другом через одну миллионную долю секунды, имели на фотографической пластинке расстояние в 1 *мм*, необходимо, чтобы скорость движения изображения была 1 *км/сек*; при расстоянии зеркала от пластинки в 1 *м* число оборотов должно быть около 80 в секунду.

с меньшим периодом, но тут скоро наступает предел наблюдения при помощи вращающегося зеркала: для $\tau < 0{,}000\,000\,2$ *сек* (что соответствует $\lambda < 60$ *м*) накаленный газ искры не успевает охлаждаться, и разделение изображения отдельных колебаний становится смытым[1]. Измерять непосредственно период еще более коротких колебаний мы в настоящее время не имеем средств.

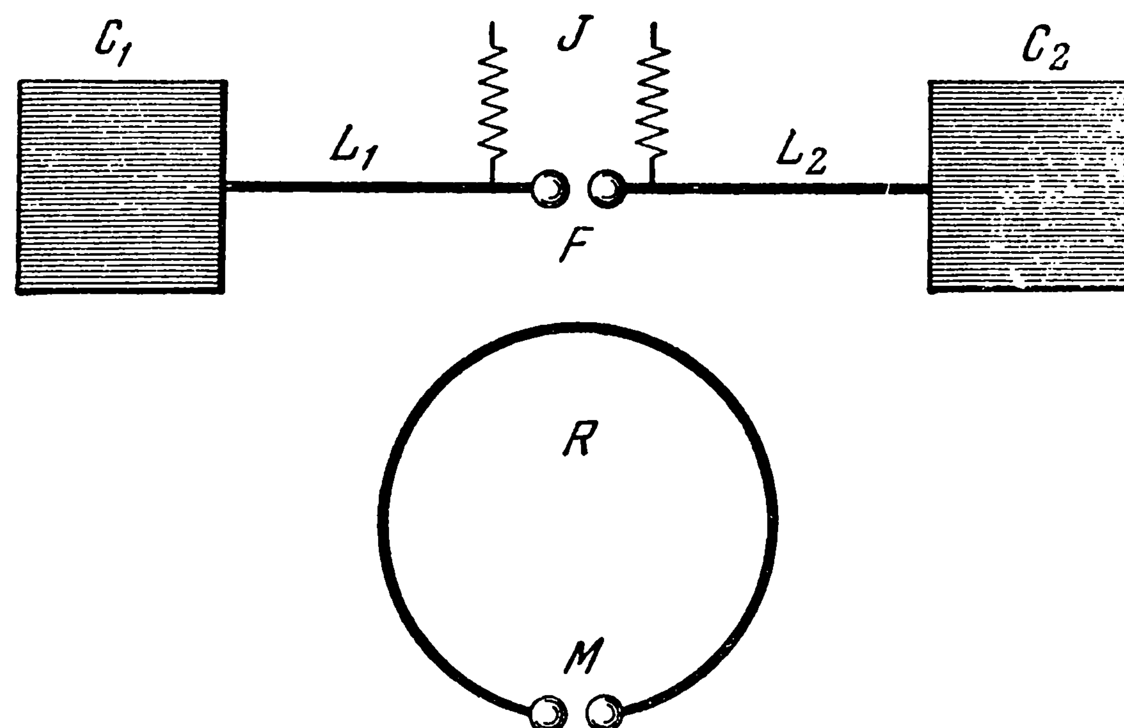


Рис. 3.

Гельмгольц (1867) указал другой способ получать электрические колебания: соединяя вторичную обмотку спирали Румкорфа с конденсатором (с лейденскою банкою), мы получаем такую же систему, как в опыте Феддерсена: при размыкании тока в первичной цепи конденсатор заряжается, а потом, предоставленный самому себе, разряжается через соленоид спирали Румкорфа [6], давая ряд свободных колебаний. Колебания таких систем исследовали Н. Н. Шиллер [7] и Р. А. Колли [8]. Самый метод наблюдений («падающий маятник» Гельмгольца) позволяет наблюдать колебания периода $\tau > 0{,}000\,03$ *сек* ($\lambda > 10$ *км*).

Новая эра в изучении электрических колебаний начинается с работ Герца (1887 г.). Он задался целью построить прибор — вибратор, который давал бы электрические колебания возможно малого периода: он уменьшил емкость конденсатора, насколько было возможно удалив обкладки его C_1 и C_2 друг от друга (рис. 3) и соединив эти обкладки проводником с возможно малою самоиндукцией — прямым, толстым металлическим прутом L_1L_2 (с искровым промежутком F посредине); чтобы удобно заряжать эти обкладки, они были соединены при помощи проволок J с индукторием; при каждом колебании молоточка индуктория проводники C_1 и C_2 разряжаются через искровой промежуток F, и вибратор дает серию затухающих колебаний.

---

[1] См. D e k o m b e [9]. Arch. de Géneve, 1898.

Для обнаружения колебаний вибратора Герц воспользовался явлением электродинамической индукции: в проволоке R, период собственного колебания которой равен периоду вибратора, находящейся, следовательно, в резонансе с последним, а потому называемой резонатором,— в этой проволоке наведенная электродвижущая сила достаточно велика, чтобы образовать в перерыве M искру: длина искры может служить мерилом возбуждения резонатора[1].

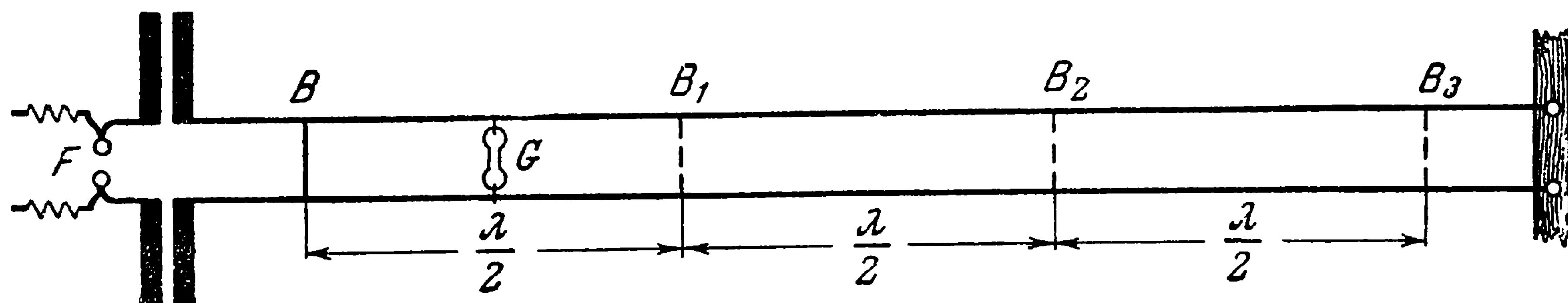


Рис. 4.

Не имея возможности определять период колебания, Герц был первым (1888), который обратился к измерениям длины волны; заставляя волны, возбужденные вибратором, итти вдоль длинной проволоки и отражаться от конца ее или же свободно распространяться в пространстве и отражаться от большого плоского металлического зеркала, Герц получал стоячие волны, исследуя резонатором их узлы и пучности, он измерял расстояние между узлами и определял λ. Для своего первого вибратора Герц нашел $\lambda = 9$ *м*.

Для исследования стоячих волн в проволоках Лехер (Lecher, 1889) предложил весьма удобную систему (рис. 4): две параллельные медные проволоки оканчиваются конденсаторами, между двумя обкладками которых, в искровом промежутке F, происходит разряд (конденсаторы заряжаются индукторием). Система, состоящая из конденсатора (цинковых листов), проволок и замыкающей проволоки «мостика» B, приходит в колебания, причем часть этих колебаний ответвляется от мостика и идет по проволокам, в чем нас убеждает свечение гейслеровой трубочки G, помещенной поперек этих проволок. Если взять второй «мостик» и соединить им обе проволоки, то гейслерова трубочка потухнет: передвигая этот второй мостик, мы легко находим для него положение B_1, при котором трубка начинает опять ярко светиться: это будет в том случае, когда система

[1] Впоследствии Тесла (1892) обнаружил резонанс для медленных колебаний: в качестве первичной катушки индуктивного прибора он воспользовался соленоидом, по которому проходит разряд лейденской батареи; вторичная катушка этого индуктивного прибора состоит из соленоида с гораздо большим числом оборотов (но без добавочной лейденской батареи). Прибор Тесла есть тот же снаряд Румкорфа, первичная обмотка которого питается переменным током колебательного разряда.

между мостиками B и B_1 будет в резонансе с возбуждающею системою, и стоячие волны, образующиеся в этих связанных между собою системах, не мешают друг другу. Передвигая мостик дальше, мы находим второе положение B_2, при котором трубка тоже светится; первый обертон системы между мостиками B и B_2 совпадает с периодом возбуждающего колебания и т. д.; таких полуволн можно обнаружить до двадцати и более. Размер волны обусловливается длиною проволоки (он не зависит от расстояния между проволоками и от их диаметра); так, Троубридж [10] и Дюэйн [11] (Trowbridige and Duane, 1895) пользовались системой, которая давала $\lambda = 114$ *м*, т. е. такие длины волн, для которых возможно было вращающимся зеркалом определить период колебания разрядов; измеренный период колебания был $\tau = 0{,}375$ миллионных долей секунды. Одновременные наблюдения длины волны и периода позволяют нам вычислить скорость распространения волн вдоль проволок; опыты показывают, что она равна 300 000 *км/сек*.

Постепенно уменьшая размеры системы Лехера, легко ее приспособить и для коротких волн; можно обнаружить стоячие волны в проволоках при $\lambda = 4$ *м*[1].

Наибольший интерес представляют опыты Герца с распространением электромагнитных волн в свободном пространстве; для получения явлений отражения и преломления в той форме, как мы их наблюдаем для световых лучей, существенно необходимо, чтобы размеры зеркал и призм были велики сравнительно с длиною волны. Герц построил (1889) вибратор, дающий еще более короткие волны; для этого он уменьшил самоиндукцию, взяв проводник значительного диаметра, и уменьшил емкость, совершенно не присоединяя цинковых листов; роль емкости играют концы проводника. Длина полуволны такого цилиндрического вибратора равна его длине.

Резонаторами в этих опытах были два прямолинейных проводника R_1 и R_2 (рис. 5); длина каждого из них равнялась полуволне; при одновременном возбуждении этих проводников сближенные концы их получают заряды разного знака, и в M проскакивает искра, служащая показателем возбуждения резонатора.

Для волн с $\lambda = 60$ *см* Герц построил два параболических металлических зеркала (в 2 *м* высотой): вибратор, помещенный в фокусной линии первого зеркала, давал пучок электромагнитных лучей, которые, попадая на второе вогнутое зеркало, собирались в его фокусной линии и возбуждали помещенные там резонаторы.

Герц показал, что пучок электромагнитных лучей поляризован, что он отражается от плоского зеркала и преломляется в призме по законам оптики и что свойства электромагнитных колебаний тождественны со свойствами световых колебаний.

---

[1] Marx [12]. Wied. Ann., 66, 1898.

Электромагнитная теория света Максвелла, выработанная им в 1863 г. и до 1889 бывшая чем-то ненужным, сложным и никому не интересным, сразу стала единственною возможною для нас теориею света. Во всей истории физики, может быть, нет более поучительного примера, что теория, слишком далеко ушедшая от опыта, даже высказанная таким всеми признанным гением, как Максвелл, все-таки оставалась бесплодною и недоступною не только для заурядных, но и для передовых ученых, покуда опыт не дал теории естественной, всеми легко схватываемой простоты и наглядности.

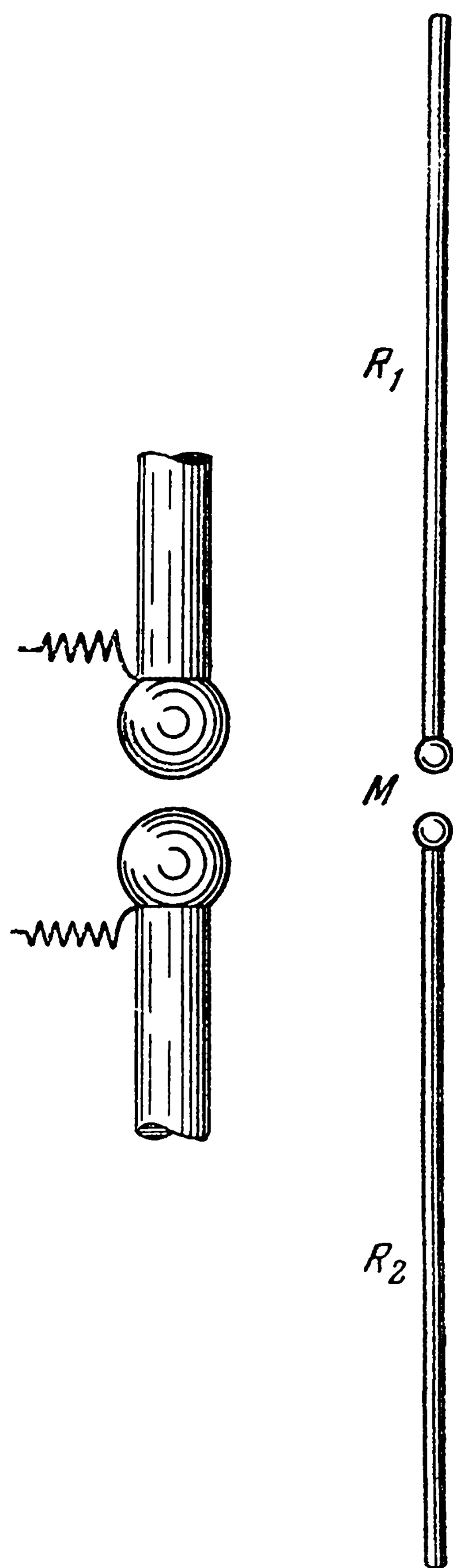


Рис. 5.

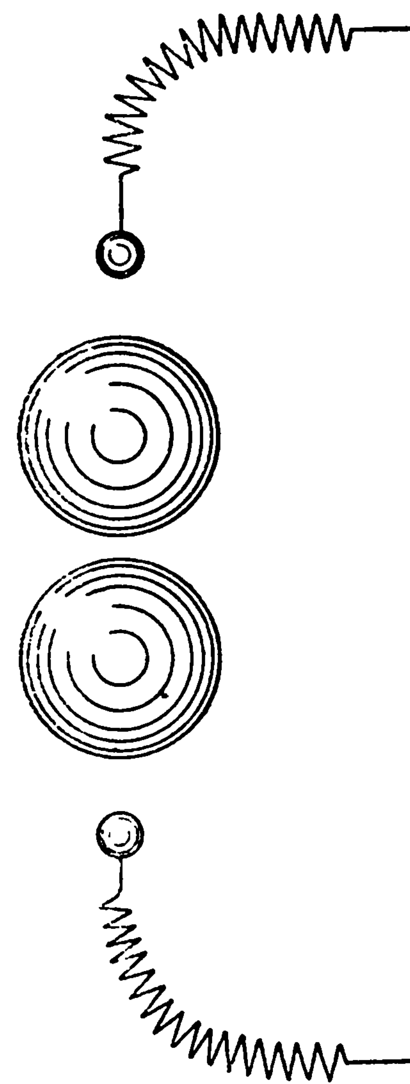


Рис. 6.

Риги (Righi, 1895) продолжал работы Герца; он еще уменьшил размеры вибратора; его вибратор (рис. 6) состоял из двух шаров, к которым заряд проводился двумя искрами от индуктория или от электрической машины. Пользуясь волнами в $\lambda = 10$ *см* и приборами соответствующих

размеров, Риги воспроизвел все оптические опыты до эллиптической поляризации луча включительно.

Для определения длины волны свободно распространяющегося пучка электромагнитных колебаний пользуются интерференционным методом, указанным Больцманом (Boltzmann, 1890); пучок лучей, выходящий из параболического зеркала V (рис. 7), частью отражается от плоского зеркала M_1, частью от такого же зеркала M_2 и падает на второе параболическое зеркало R, в котором находится резонатор; если мы начнем передвигать зеркало M_2 и увеличивать путь одной половины пучка, то можем

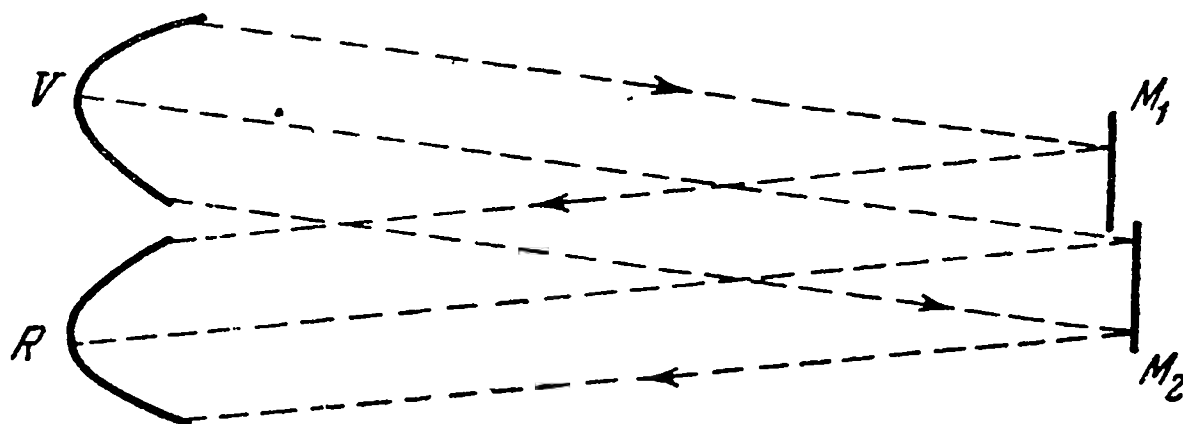


Рис. 7.

подобрать для них такую разницу путей, при которой вторая половина пучка будет подходить к резонатору, опаздывая на полволны; вторая половина пучка будет возбуждать в нем колебания в противоположном направлении сравнительно с колебаниями, возбуждаемыми первою половиною; противоположные колебания, складываясь, взаимно уничтожаются: резонатор не будет возбуждаться. Увеличивая разность путей до целой волны, мы увидим, что вторая половина пучка будет действовать согласно с первою, увеличивая возбуждение резонатора; разница длины путей, которую надо дать пучкам для того, чтобы получить снова максимальное возбуждение резонатора, непосредственно и измеряет длину волны колебания.

Пользуясь своим вибратором и уменьшая его размеры, Риги (1895) мог наблюдать искру между прямолинейными резонаторами еще при $\lambda = 2{,}5$ *см*; при дальнейшем уменьшении приборов метод, указанный Герцем,— искра — оказывается более не применимым для наблюдения возбуждения резонатора; напряжение, получаемое от электродинамической индукции в резонаторе, длина которого меньше 1,2 *см*, уже так мало, что его не хватает для образования искры даже микроскопической длины. При еще меньших резонаторах можно с успехом воспользоваться двумя другими методами, применяемыми также и для больших волн: термоэлементом Клеменчича (Klemenčič) [4] и когерером Бранли (Branly).

Если к концам резонаторов R_1 и R_2 (рис. 8), между которыми должна проскакивать искра, припаять проволоки разнородных металлов (например, Pt и Fe) и накрест захлестнуть их, как показано на чертеже, то при

возбуждении резонаторов разряды переходят по проволокам, нагревают их и место их соприкосновения; вследствие этого получается термоэлектрический ток, обнаруживаемый чувствительным гальванометром G, отклонением стрелки которого и измеряется возбуждение резонаторов.

Метод «когерера» заключается в следующем: концы резонаторов R_1 и R_2 (фиг. 9) находятся в стеклянной трубочке M, наполненной металлическими опилками; благодаря микроскопическому слою окиси на поверх-

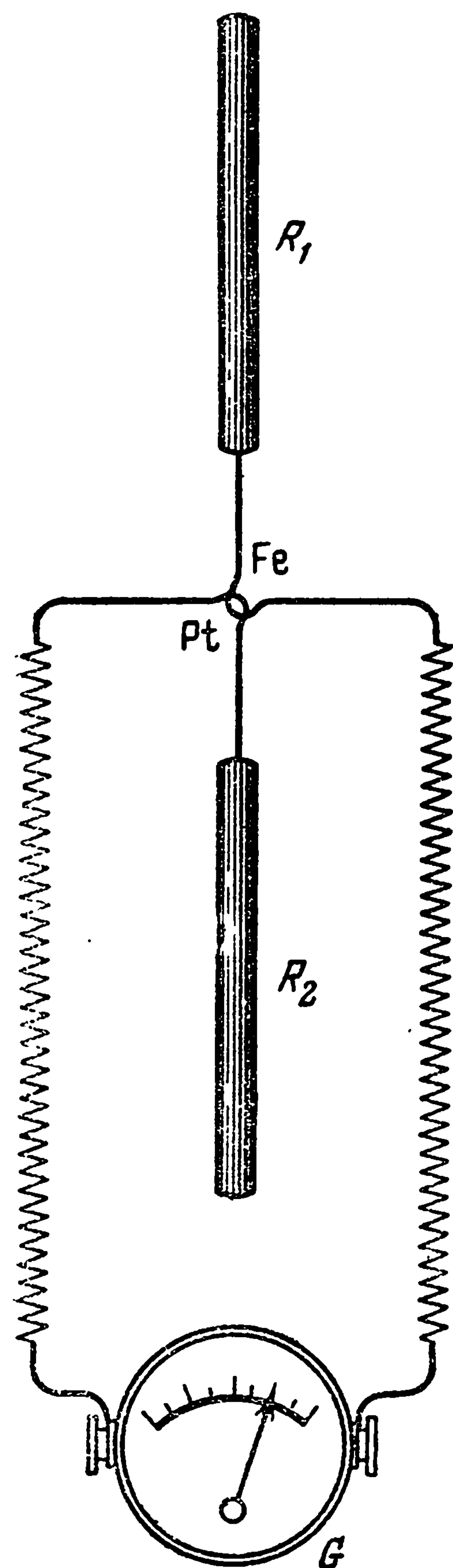


Рис. 8

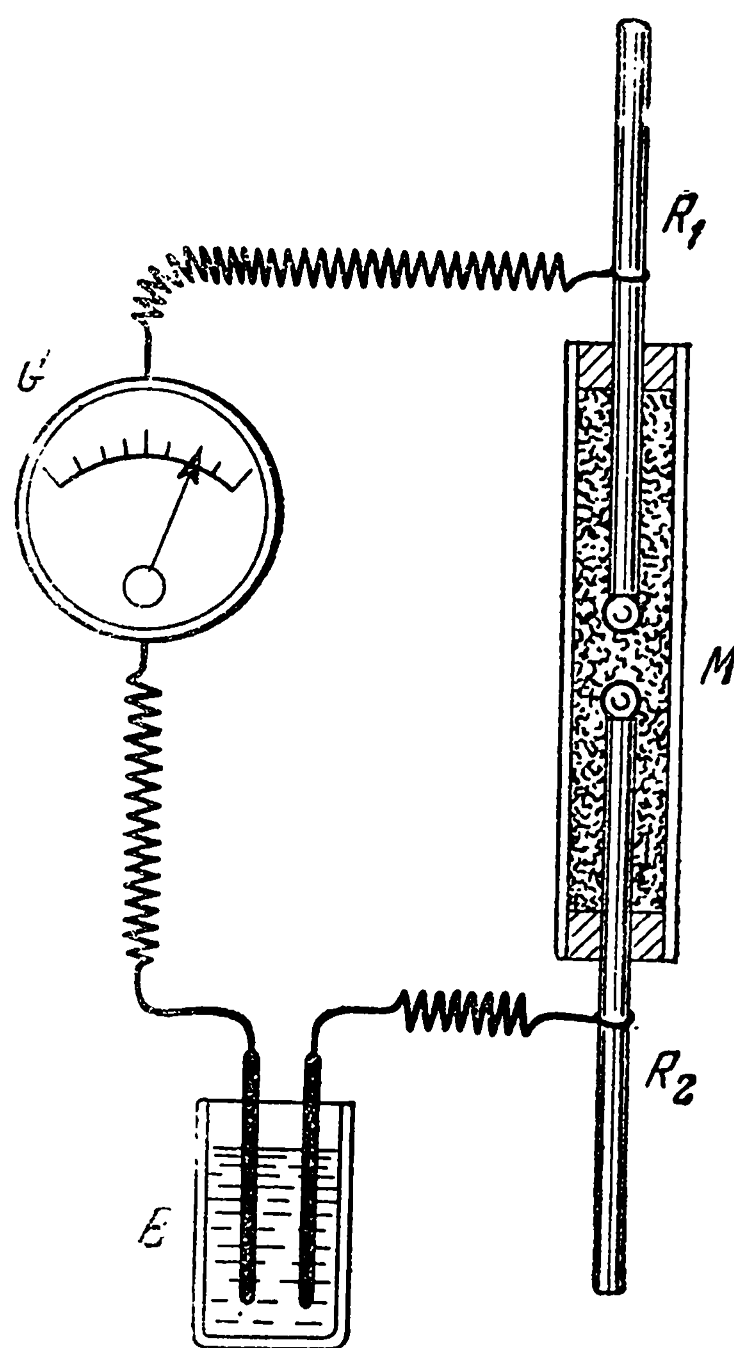


Рис. 9.

ности отдельных металлических зерен между ними нет соединения, необходимого для проводимости; введя в цепь опилки, батарею B и гальванометр G, мы в этом последнем не будем наблюдать тока. Но достаточно очень слабого заряжания концов резонаторов, которое получается при возбуждении в них колебаний, чтобы опилки «спаялись» и сразу стали

проводить электричество. Нарушить эту связь можно легким сотрясением; когерер становится опять способным воспринять и обнаружить новое колебание резонаторов [1].

Пишущему эти строки удалось (1895) получить и при помощи термоэлемента наблюдать электромагнитные волны в $\lambda = 6$ *мм*; с этими волнами можно было обнаружить двойное преломление в кристаллах серы и построить для них призму Николя. Еще уменьшая вибратор — делая его из двух цилиндриков в 0,3 *мм* толщины и 0,8 *мм* длины, я обнаружил слабые, но несомненные следы колебаний при $\lambda = 3$ *мм*. До настоящего времени это самые короткие электромагнитные волны, которые когда-либо наблюдались при искровом разряде проводников.

Пользуясь когерером, Бозе [14] (Bose, 1896) также наблюдал волны в $\lambda = 6$ *мм* и Лампа [15] (Lampa, 1897) исследовал преломление волн в $\lambda = 4$ *мм*.

Сопоставляя все сказанное выше, мы видим, что экспериментальная техника выработала способы получения электрических волн, начинающихся от бесконечно длинных до волн в $\lambda = 15$ *км* в виде принужденных колебаний с неизменною амплитудою, даваемых магнитоэлектрическими машинами. Эти колебания далеко заходят в область колебаний, которые дают нам проводники при искровом разряде; здесь мы имеем колебания, начиная от $\lambda = 600$ *км* и кончая колебаниями в двести миллионов раз более короткими, с $\lambda = 3$ *мм* [16].

Однако современная физика не может довольствоваться этим колоссальным интервалом известных уже электромагнитных волн; дело в том, что, переходя к волнам $\lambda = 1$ *мм*, мы попадаем в область волн, соответствующих уже молекулярным колебаниям материи; но для всестороннего исследования свойств материи нам необходимо пользоваться еще меньшими колебаниями. Тепловое лучеиспускание, как мы увидим дальше, не может давать лучей $\lambda > 0{,}1$ *мм*; для получения колебаний, заключающихся между $\lambda = 3$ и $\lambda = 0{,}1$ *мм* нам необходимо найти новый источник.

Измерять длины этих более коротких волн интерференцией и наблюдать их термоэлементом не составит трудности, но получать их известными уже приемами вряд ли возможно; вибратору и резонатору нужно было бы дать размеры, по сравнению с которыми самые тонкие произведения часовщика или ювелира — только неуклюжие металлические массы; количество энергии, которое в виде заряда можно запасти на таком микроскопическом вибраторе, неуловимо мало; сверх всего этого является еще совершенно неизвестным, возможны ли образования колебаний при искровом разряде таких ничтожных зарядов [2]. Сейчас мы не имеем возможности

---

[1] При беспроволочной телеграфии Маркони [13] когерер служит также для регистрирования волн во много метров длины.

[2] Появление искрового разряда даже в большом вибраторе Герца еще не служит достаточною причиной для образования колебаний: стоит дохнуть на искровой перерыв, чтобы всякое возбуждение в резонаторе исчезло, хотя искра и проскакивает

предвидеть, как удастся разрешить это затруднение; во всяком случае тут встретятся значительные затруднения, и способ получения еще более коротких волн будет очень крупным шагом вперед в области экспериментальной физики.

От самых коротких электромагнитных волн в $\lambda = 3$ *мм*, которые мы получаем при помощи искрового колебательного разряда электрических заряженных проводников, до тех электромагнитных волн, которые возникают, например, при нагревании тел (термическое лучеиспускание) и в частном случае ощущаются нашим глазом как «видимый свет», лежит еще очень большой промежуток.

Волны эти настолько коротки, что для измерения их удобнее взять мелкую единицу, малую долю одного миллиметра. Такие единицы суть

$$1 \text{ микрон} = 1\ \mu = 0{,}001\ \textit{мм};$$

$$1 \text{ микромикрон} = 1\ \mu\mu = 0{,}000\,001\ \textit{мм}\ [17].$$

Обыкновенно в спектроскопии пользуются еще меньшею единицею, которую ввел Ангстрем (Angström, 1868), при первом полном определении длин волн солнечного спектра и которая в честь его носит название Ангстремовской единицы Å:

$$1\ \text{Å} = 0{,}000\,000\,1\ \textit{мм}.$$

Рассмотрим теперь способы наблюдения и измерения этих коротких волн.

Наиболее удобный способ определения длины волны — определение при помощи дифракционной решетки Фраунгофера [18] (Fraunhofer, 1832); на пути пучка параллельных лучей поставлен ряд не пропускающих свет препятствий (рис. 10), между которыми оставлены на равных расстояниях равной величины промежутки, где волны свободно проходят (отсюда название «решетки»); большая часть света продолжает идти в прежнем направлении, но некоторая часть его уклоняется от этого направления; если падающий луч монохроматический, т. е. представляет собою колебание с одним определенным периодом, то уклоняющийся луч идет в нескольких совершенно определенных направлениях вправо и влево от первоначального направления. Углы отклонений φ_1, φ_2... этих лучей, как известно, находятся в простой зависимости от расстояния середин двух соседних просветов l («периода решетки») и длины волны λ падающего света[1]:

$$\sin\varphi_1 = \frac{\lambda}{l}\,;\ \sin\varphi_2 = 2\,\frac{\lambda}{l}\,;\ \sin\varphi_3 = 3\,\frac{\lambda}{l}\ \ldots;\ \sin\varphi_n = n\,\frac{\lambda}{l}\,.$$

беспрепятственно. Вот почему экспериментирование с герцевскими колебаниями (особенно при малых λ) требует большой опытности.

[1] См. Зилов. Курс физики, отд. V, стр. 169. Варшава, 1900; Хвольсон. Курс физики, II, стр. 538. СПб, 1898.

Пучок «белого» света мы можем рассматривать как наложение бесконечного множества монохроматических пучков со всевозможными длинами волн; помещая на пути такого пучка дифракционную решетку, мы разбиваем отклоняющиеся лучи на группы соответствующих монохроматических волн, но эти группы, в свою очередь, «налагаются» друг на друга.

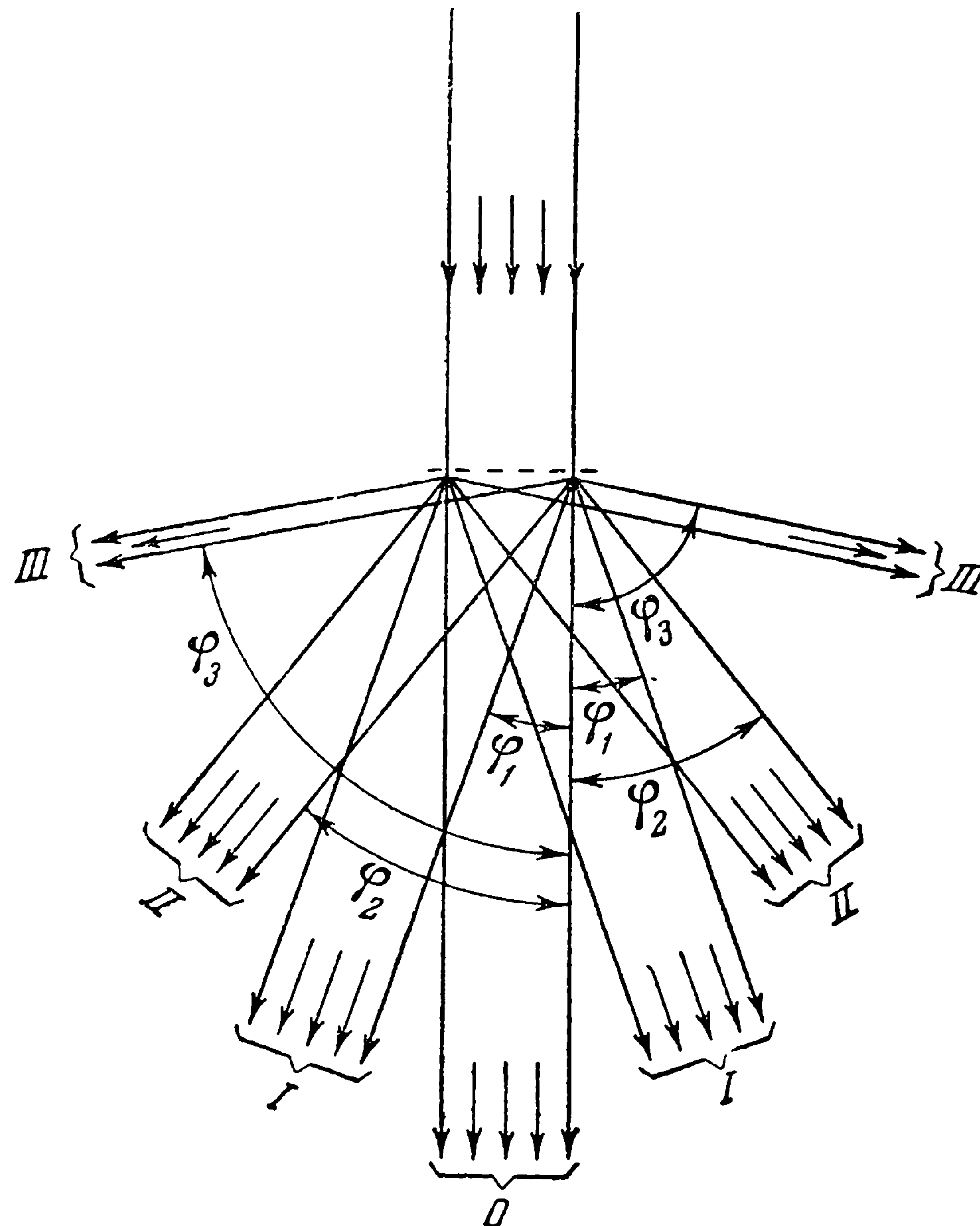


Рис. 10.

Действительно, для какого-нибудь определенного угла отклонения φ мы имеем

$$\sin\varphi = n\frac{\lambda}{l},$$

где n есть целое число, и потому в этом месте соберутся всевозможные волны, которые удовлетворяют условию

$$\lambda_1 = 2\lambda_2 = 3\lambda_3 = \ldots = n\lambda_n = \ldots;$$

из них наибольшая волна λ_1 соответствует $n = 1$ — дифракционному спектру «первого порядка», следующая $\lambda_2 = \frac{\lambda}{2}$ соответствует дифракционному спектру «второго порядка» и т. д., а n может иметь любую величину с тем, однако, ограничением, чтобы соответствующие ему очень малые волны действительно существовали в данном пучке света.

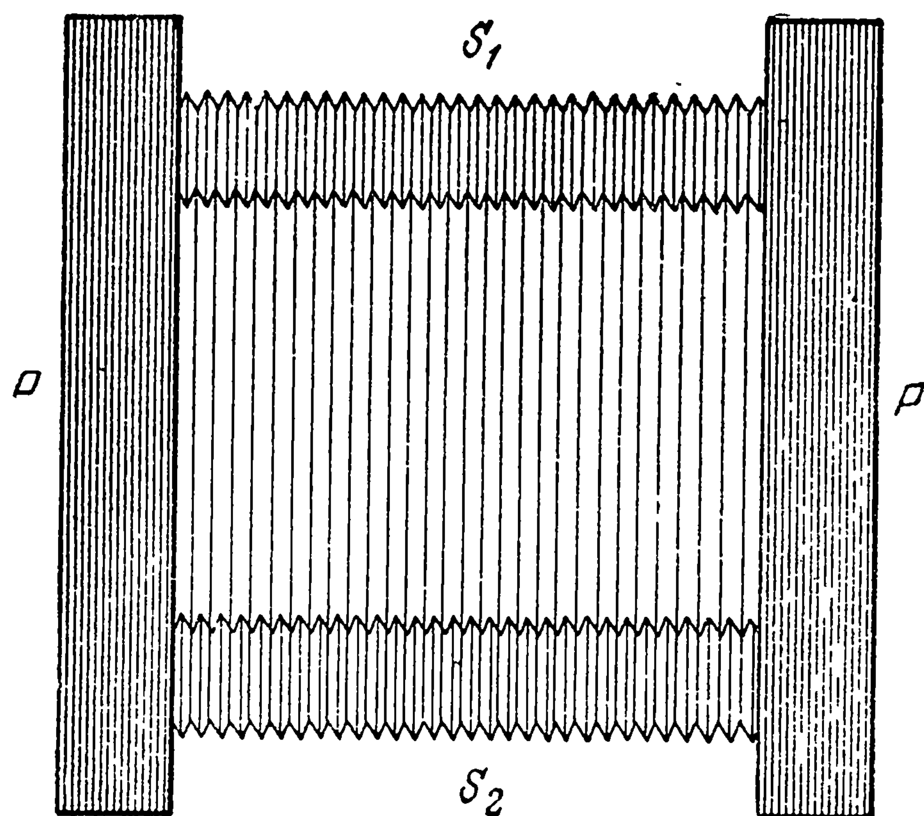


Рис. 11.

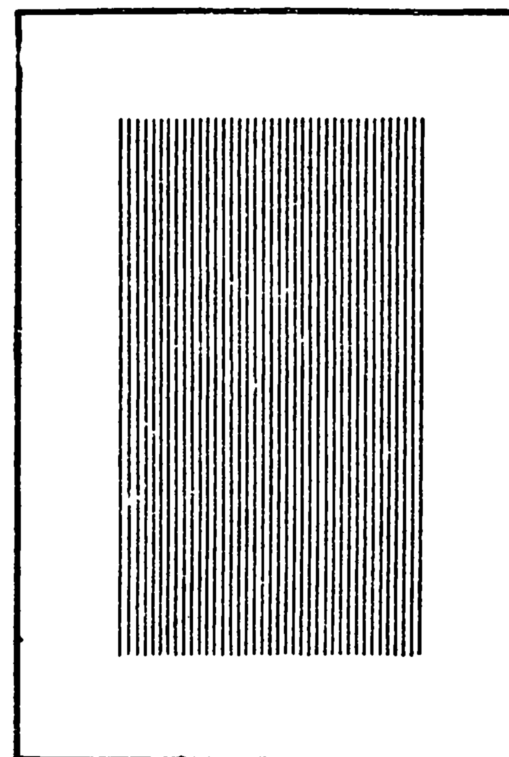


Рис. 12.

Фраунгофер построил дифракционную решетку следующим образом: два тщательно сработанных винта S_1 и S_2 (рис. 11) с равным ходом соединены между собою пластинками PP; металлическая проволока намотана на оба винта таким образом, что она удерживается в винтовом ходе: получаются две дифракционные решетки. Для того чтобы получить одну решетку, проволока припаивается к винтам и потом лишняя решетка срезается ножницами. Такая решетка удовлетворяет вполне основным требованиям: все просветы отстоят друг от друга на равных расстояниях, период решетки l невелик и число щелей значительно. При своих исследованиях в инфракрасном спектре Рубенс (Rubens, 1897) пользовался такой проволочною решеткою с периодом в 0,37 *мм* и мог наблюдать для желтого (натриевого) света спектр 107-го порядка; длина волны этого желтого света $\lambda = 0{,}59\mu$, а поэтому отклонение 107-го ее спектра соответствует отклонению первого порядка для инфракрасных лучей, у которых $\lambda = 63{,}1\,\mu$ — величина, и наблюдавшаяся Рубенсом, как увидим ниже.

Для получения решеток, значительно больше отклоняющих лучи данной длины волны, необходимо уменьшить «период» решетки; при проволочных решетках Фраунгофера скоро наступает предел; нарезать винт с числом ходов более двадцати на один миллиметр — задача технически

крайне трудная, так же как и вытягивание проволок меньше 0,08 *мм* диаметра.Ноберт [19] (Nobert, 1952) обошел эту трудность таким способом: он взял стеклянную пластинку (рис. 12), и, пользуясь делительной машиной, алмазом начертил на ней большое число равноотстающих параллельных линий; при движении по стеклу острие алмаза выкрашивает в гладкой поверхности бороздку, которая мешает свободному распространению света, рассеивая его в разные стороны (как «матовое» стекло), тогда как через гладкие поверхности стекла, остающиеся между бороздками, свет проходит свободно, как в воздухе; таким образом, в решетке Ноберта бороздки являются непрозрачными препятствиями для света, как проволоки в решетке Фраунгофера. Пользуясь таким приемом, Ноберт мог получать решетки, в которых число бороздок доходило до 300 на 1 *мм* (т. е. в 15 раз больше, чем у Фраунгофера), что далеко оставляет за собою фраунгоферовские решетки.

Производство таких «начерченных» решеток значительно усовершенствовал Рутерфорд [20] (Rutherfurd, 1872), заменив стекло плоским металлическим зеркалом: явление дифракции, наблюдаемое в этом случае, таково, как будто пучок света, в действительности падающий на поверхность решетки и отражаемый ею, выходил бы из-за зеркала и пересекал бы поверхность с начерченною на ней решеткою, как в случае нобертовской решетки. При черчении по металлу алмаз почти не изнашивается, тогда как при работе по стеклу он легко портится; бороздки имеют ровные, незазубренные края, и металлическая поверхность допускает черчение до 800 бороздок на 1 *мм* [1] без того, чтобы промежутки между бороздками выкрашивались. Зеркальная решетка имеет еще и то огромное преимущество, что свет движется только в воздухе и не проходит стекла (которое поглощает, т. е. не пропускает инфракрасных и ультрафиолетовых волн).

До высшего совершенства конструкцию зеркальных решеток довел американский физик Роуленд [21] (Rowland, 1878). Построив делительную машину, в которой периодические ошибки в ходе винта так малы, что не могут быть обнаружены тончайшими измерениями, он поместил эту машину на дне глубокой шахты, где постоянство температуры было обеспечено и не нарушалось самим работающим, так как машина приводилась в действие двигателем и автоматически производила все необходимые движения. Большие решетки Роуленда имеют по 800 бороздок на 1 *мм* при длине бороздок в 8 *см*; общая ширина решетки доходит до 20 *см*, что составляет 160 000 бороздок [2].

Роланд усовершенствовал зеркальную решетку замечательно остроумным образом, нанося бороздки не на плоское, а на вогнутое зеркало;

---

[1] В виде опыта черчения на металле Роуленд доводил число бороздок до 1700 на 1 *мм*.

[2] На проведение одной бороздки требуется 5 *сек*; следовательно, вся решетка изготовляется в течение более 9 суток: все это время делительная машина работает без перерыва и без надзора; цена подобной решетки около 800 руб.

такая вогнутая решетка Роуленда не требует добавочных оптических частей. Действительно, если в центре кривизны роландовской решетки мы поместим щель S (рис. 13), через которую проходит свет источника L, то лучи, расходясь, упадут на зеркало, и главная часть их, отразившись, снова соберется на щели S, давая тут действительное ее изображение.

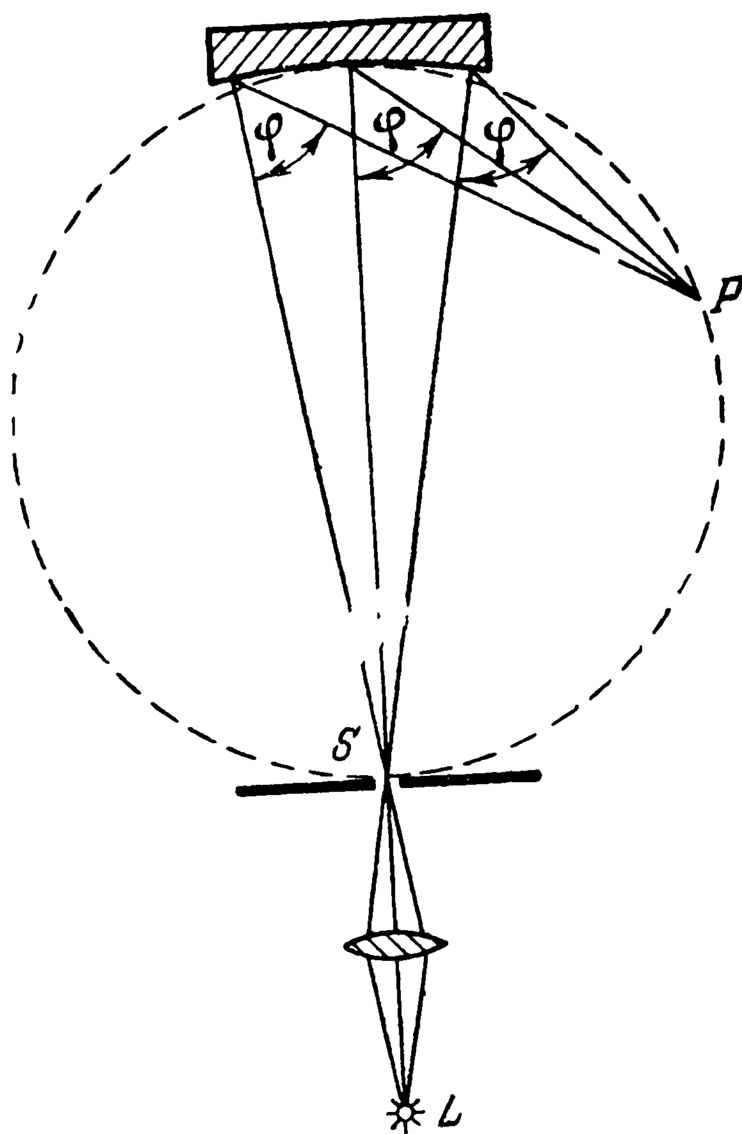


Рис. 13.

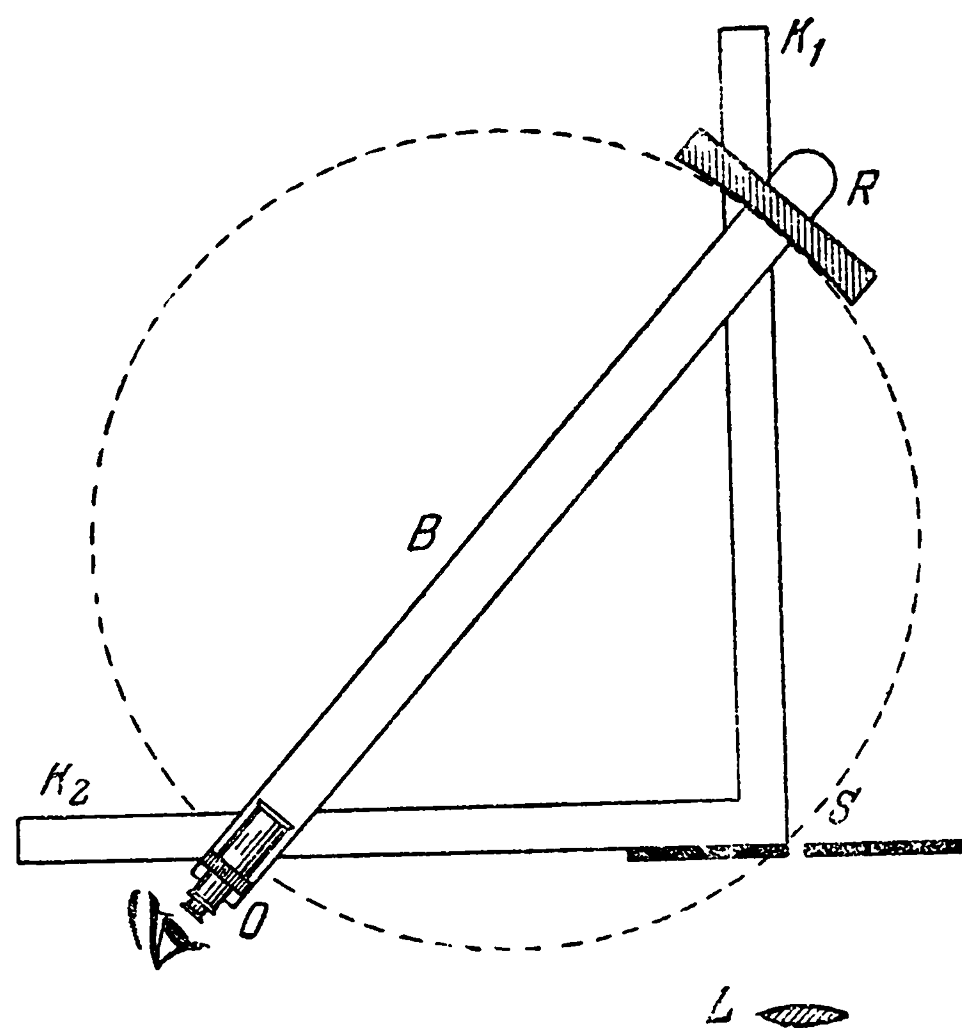


Рис. 14.

Часть света, как мы знаем, отклонится, благодаря дифракции; если свет монохроматический, то угол отклонения φ от направления падающего луча для всех частей решетки будет одинаков, так как период ее везде имеет ту же величину (см. выше); все эти отклоненные лучи соберутся в одной точке P[1]; эта точка P лежит на круге, диаметр которого равен радиусу кривизны решетки; расстояние от S до P есть хорда, на которую опираются равновеликие углы φ. Если мы на место P поставим щель с источником света, то главная часть света отразится от зеркала по законам геометрической оптики, а часть света, отклоненного каждой частью решетки на тот же угол φ, соединится в точке S; таким образом, по отношению к данной длине волны падающего света точки P и S являются сопряженными.

Для более удобного пользования вогнутой решеткой Роуленд предложил такое расположение: два рельса K_1 и K_2 (рис. 14) поставлены под

[1] Вернее сказать: «почти в одной точке P»; отступления практически незаметны, так как величина решетки очень мала по сравнению с радиусом ее кривизны.

прямым углом, в вершине которого помещена щель S, по этим рельсам может скользить поперечный брусок B, притом так, что концы его всегда двигаются вдоль рельсов; длина бруска равна радиусу кривизны вогнутой решетки R, которая укреплена на одном его конце, тогда как на другом помещена фотографическая пластинка для снимания спектра или окуляр O для рассматривания его глазом. При всех положениях гипотенузы B щель, лежащая в вершине прямого угла, будет находиться на круге, который описан на гипотенузе как на диаметре.

Такая вогнутая решетка Роуленда при радиусе кривизны около 6 *м* разделяет в спектре первого порядка двойную желтую линию пламени, подкрашенного солями натрия (длины волн которых $D_1 = 0{,}589\ 62$ и $D_2 = 0{,}589\ 02\,\mu$), на две линии, расстояние между которыми на фотографической пластинке около 5 *мм*, так что в солнечном спектре между ними отчетливо видно еще 11 других фраунгоферовских линий.

Решетки Роуленда настолько совершенны, что позволяют пользоваться сильными окулярами и с уверенностью наблюдать угол отклонения лучей, а следовательно, и измерять длину волны с точностью до стотысячных долей всей величины [22]; их можно отнести к наиболее совершенным измерительным приборам современной физики.

Разлагая при помощи дифракционной решетки белый свет, идущий от какого-нибудь источника (например, от накаленного твердого тела), мы можем наблюдать, что этот свет разлагается на радужные цвета, причем красный отклоняется всего больше, а фиолетовый всего меньше; измерив углы отклонения и период решетки, мы находим следующие длины волн:

Красного цвета	0,75 μ
Оранжевого	0,65
Желтого	0,57
Зеленого	0,50
Голубого	0,45
Синего	0,41
Фиолетового	0,38

Таким образом, интервал волн, доступный непосредственному наблюдению глазом, очень невелик.

Область наблюдения значительно расширяется, если мы прибегнем к фотографии: соли серебра оказываются чувствительными не только к лучам, видимым глазом, но также (некоторые из них даже в большей степени) к лучам, невидимым для глаза; заставляя спектр от решетки падать на фотографическую пластинку, мы находим заметное действие и по ту сторону фиолетовых лучей, в ультрафиолетовой части. Если пользоваться все более и более продолжительными экспозициями, то граница, до которой еще можно проследить действие лучей, соответствует длине волны в $\lambda = 0{,}17\,\mu$.

Шуман [23] (Schumann, 1892) высказал мысль, что эта граница обусловлена не отсутствием более коротких волн в источнике или нечувствительностью фотографической пластинки, а тем, что воздух, в котором распространяются лучи, поглощает их; действительно, помещая свой спектрограф в пустоту, Шуман мог обнаружить существование еще более коротких волн в $\lambda = 0{,}1\,\mu$. В настоящее время это самые короткие ультрафиолетовые волны, которые нам известны[1] [24].

Значительный процесс в приготовлении фотографических пластинок позволил найти способы сделать фотографическую пластинку чувствительною (сенсибилизировать ее) не только для лучей красного света, но и для лучей с еще большей длиной волны. Так Абней [25] (Abney, 1887) получил фотографические отпечатки лучей в $\lambda = 1{,}3\,\mu$, что в настоящее время представляет собою предел, достигнутый фотографией в инфракрасной части спектра.

Гораздо больший интервал волн делается доступным наблюдению, если воспользоваться термическим методом: исследуемые лучи падают на поверхность, которая их поглощает, и лучистая энергия, исчезая, переходит в тепловую; тело, поглотившее лучи, нагревается, и задача сводится к тому, чтобы иметь достаточно чувствительный способ для обнаружения этого (обыкновенно незначительного) нагревания.

Впервые подобный прием был употреблен Меллони [26] (Melloni, 1833), который заставлял лучи падать на зачерненные нечетные спаи термобатареи (четные спаи которой оставались закрытыми) и наблюдал нагревание этих спаев при помощи гальванометра, который отклонялся возникающим термоэлектрическим током. Рубенс [4] значительно усовершенствовал этот прием, построив термоэлектрическую батарею с очень малой массой, благодаря чему полное прогревание спаев достигается в несколько секунд: на рамке из слоновой кости натянуты проволоки (диаметром 0,1 *мм*) из константана C_1, C_2, C_3, C_4... (рис. 15) и из железа F_1, F_2, F_3, F_4...; в местах своего взаимного пересечения разнородные проволочки спаяны и образуют зигзагом расположенную термобатарею; при опытах на некотором расстоянии от батареи ставится металлический экран (не показанный на чертеже)с вертикальною щелью, которая позволяет падать лучам только на нечетные спаи батареи.

Другой способ обнаружить нагревание от поглощенных лучей состоит в определении изменения электрического сопротивления, испытываемого зачерненною металлическою пластинкою под влиянием освещения; этот способ разработал Лэнглей [4] (Langley, 1881), и построенный им прибор назван болометром. Принцип прибора заключается в следующем: если ток от элемента E (рис. 16), разветвляясь, проходит через сопротивление

---

[1] Исследование ультрафиолетового спектра при помощи флуоресцирующих экранов значительно уступает фотографии как по чувствительности, так и по интервалу; оно удобно только как прием для лекционной демонстрации ультрафиолетовых лучей.

a, b, c, d, то гальванометр G не даст никакого отклонения (останется на нуле) только в том случае, когда соблюдено условие:

$$\frac{a}{b}=\frac{c}{d},$$

но как только одно из сопротивлений изменится, например, увеличится от нагревания, то предыдущее соотношение нарушится и стрелка гальванометра отклонится на угол, который прямо пропорционален изменению сопротивления (а следовательно, и нагреванию в нашем случае).

В болометре (рис. 17) сопротивления состоят из двух тонких платиновых листочков a и b (толщина коих приблизительно 0,001 *мм*, ширина — 1 *мм*, длина —

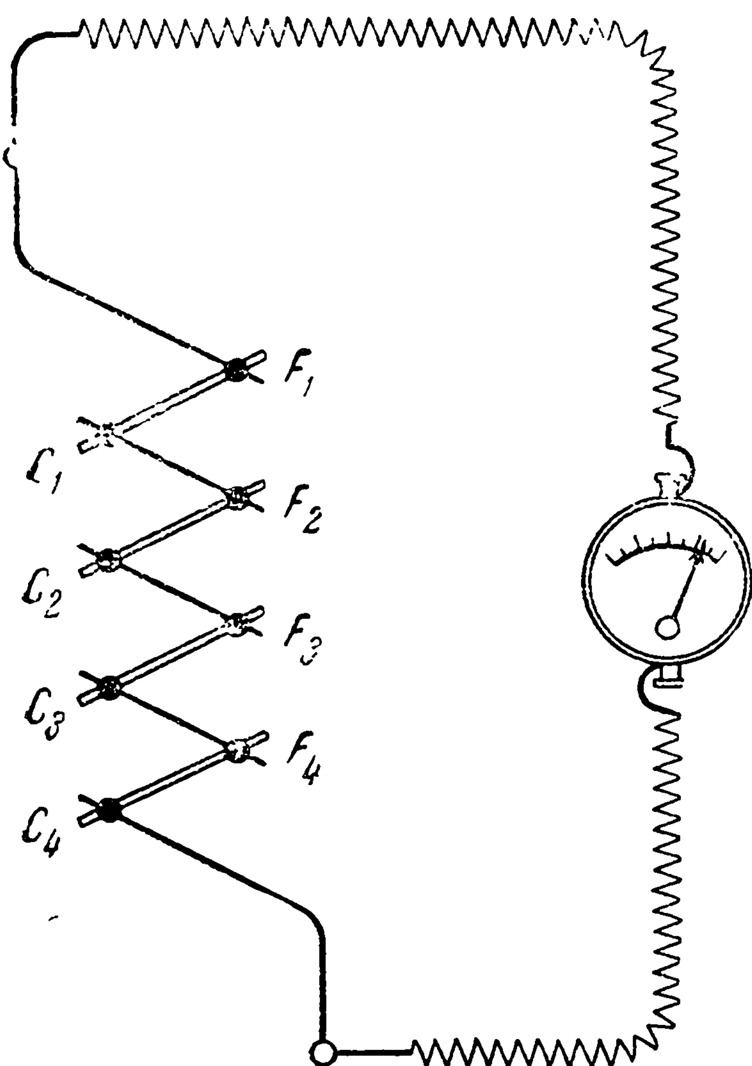


Рис. 15.

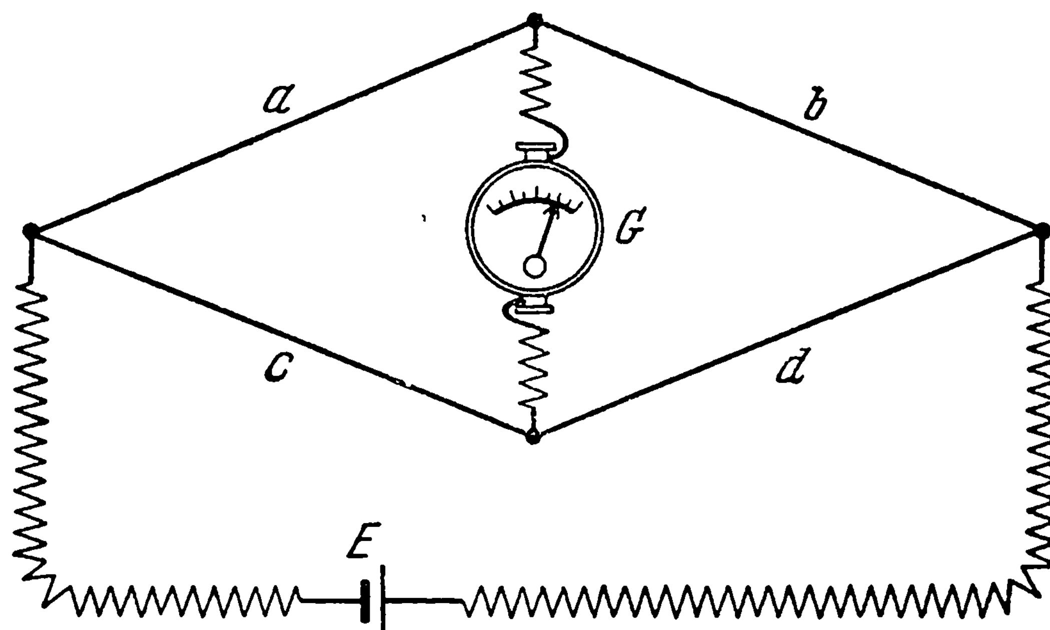


Рис. 16.

15 *мм*), покрытых платиновою чернью, и из двух проволок c и d; на некотором расстоянии от болометра стоит металлический экран с вертикальной щелью, которая позволяет лучам падать только на один из листочков, например на a.

Чувствительность как термобатареи Рубенса, так и болометра Лэнглея обусловливается исключительно чувствительностью гальванометра; при одном и том же гальванометре оба метода имеют приблизительно одинаковую чувствительность. О том, как велика эта чувствительность, можно судить по тому, что нагревание лучами, едва достигающее одной миллионной доли градуса, дает уже заметное отклонение стрелки гальванометра.

При определении с помощью решетки длины волн в инфракрасной части спектра приходится считаться с наложением спектров разных порядков, и потому необходимо пользоваться монохроматическим светом. Для

избежания поглощения этих волн в промежуточных средах (воздух пропускает их без поглощения) вместо линз пользуются вогнутыми зеркалами и располагают опыт таким образом: лучи источника L (рис. 18) проходят через щель S_1, падают расходящимся пучком на вогнутое зеркало C_1, проходят параллельным пучком призму, отклоняются ею и рассеиваются на лучи с разными длинами волн; потом зеркалом C_2 эти лучи собираются на пластинку S_2, где дают действительное изображение спектра; из всего спектрального пучка только монохроматическая часть лучей, упавшая на щель S_2, проходит дальше в виде расходящегося пучка, который, отразившись от зеркала C_3 параллельным пучком, испытывает дифракцию в фраунгоферовской проволочной решетке G, частью отклоняется на угол φ, достигает зеркала C_4 и этим последним концентрируется на термоэлемент или болометр B. Для того чтобы

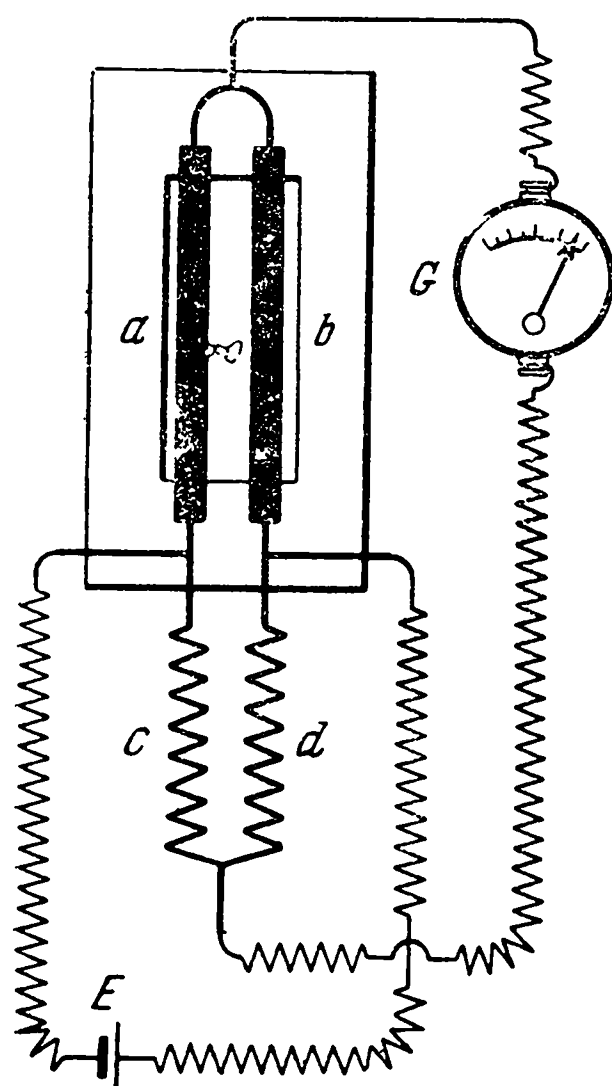


Рис. 17.

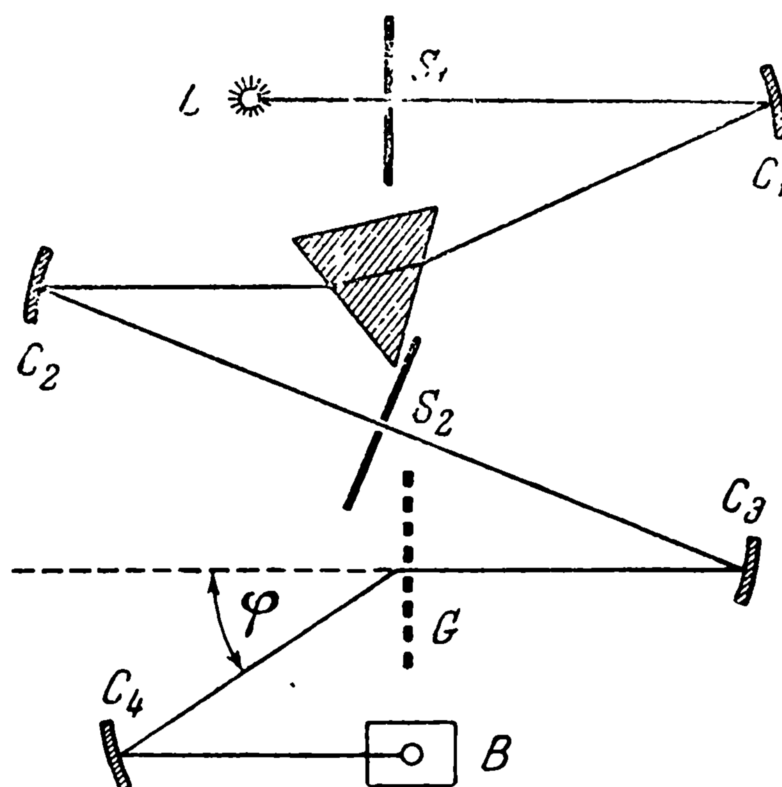


Рис. 18.

узнать, куда отклонился этот невидимый глазу луч, приходится идти ощупью, понемногу перемещая зеркало C_4, покуда стрелка гальванометра не достигнет своего максимального отклонения.

Пользуясь призмою из сильвина, можно таким образом проследить спектр до длины волны в $\lambda = 20\,\mu$.

Заменяя призматическое разложение света способом «остаточных линий», Рубенс[1] мог обнаружить волны до $\lambda = 61\,\mu$; это самые длинные «тепловые» волны, которые нам известны в настоящее время.

---

[1] См. Физическое обозрение, 1, стр. 265, 1900.

Для наблюдения и более коротких волн и определения соответствующей им яркости термический способ наблюдения является очень пригодным для волн в $\lambda = 0{,}3\ \mu$ включительно.

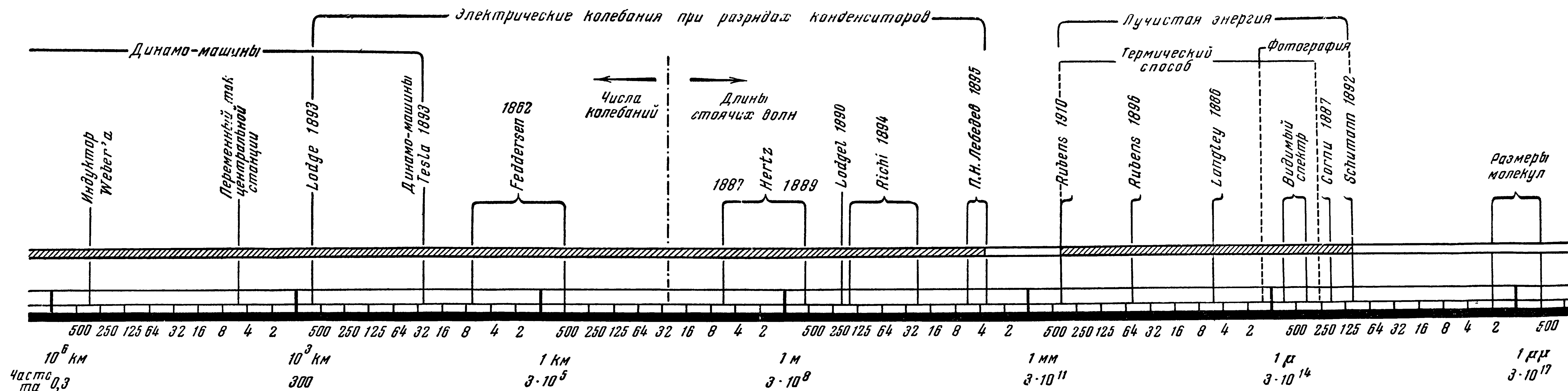
На вопрос, возможно ли ожидать значительного расширения известного нам спектра по ту сторону волн в $\lambda = 60\ \mu$, в настоящее время ответить трудно; изучение лучеиспускания черных тел позволило установить законы этого лучеиспускания для всякой длины волны в зависимости от температуры: эти законы показывают, что количество энергии, лучеиспускаемое телом в форме длинных волн, ничтожно мало по сравнению с общим лучеиспусканием; пользуясь даже самыми чувствительными термическими методами, вряд ли возможно будет перейти волны в $\lambda = 100\ \mu$, получаемые от наших источников [27].

В сторону волн еще более коротких, чем $\lambda = 0{,}1\ \mu$, вопрос обстоит несколько иначе. Мы имеем основания предполагать, что подобные волны существуют: лучи Рентгена (Roentgen, 1895) и лучи Беккереля [4] (Becquerel, 1896) указывают, что в этой области нами не все еще исчерпано. Очень возможно, что и фотографический метод исследования их, судя по приложимости этого метода к упомянутым выше лучам, оправдает возлагаемые на него надежды. Трудность, с которою приходится здесь сталкиваться на первых же шагах, чисто технического характера; для направления этих лучей нам необходимы линзы и зеркала, т. е. приборы с полированными поверхностями; та полировка, которая вполне достаточна для фиолетовых лучей, может представлять собою совершенно неровную, «матовую» поверхность для волн, гораздо меньших, так как отражение и преломление только до тех пор следует законам геометрической оптики, покуда неровности (борозды от полирующего порошка) значительно меньше длины волны. Можно ли достигнуть такой полировки известными нам средствами и, что еще важнее, как убедиться в том, что такая полировка достигнута,— это вопросы, которые заставляют задуматься и искать новых путей и способов исследования.

Спускаясь к еще меньшим волнам, мы скоро подходим к размерам, которые, по теории газов, равны размерам отдельных молекул; каковы будут в этом случае «оптические» явления, когда материя явится крупнозернистою и неравномерною по сравнению с волною, предугадать трудно. Может быть, что те особенности лучей Рентгена и Беккереля, которые позволяют нам сомневаться в возможном тождестве их с известными уже нам электромагнитными волнами, обусловлены только соизмеримостью этих волн с молекулами тела. Во всяком случае, в изучении более коротких ультрафиолетовых волн открывается заманчивая перспектива связать уже известную нам оптику с лучами Рентгена и Беккереля [28].

Для того чтобы составить себе ясное представление о том, как велика та шкала электромагнитных волн, которая в настоящее время находится в нашем распоряжении, и выяснить те пробелы, которые еще имеются в ней, полезно графически представить полученные результаты.

Шкала электромагнитных волн



При изучении волнообразных движений существенным условием является не абсолютные величины длин волн или чисел колебаний, а взаимные отклонения соответствующих величин. Поэтому и графическое изображение должно наглядно давать эти отношения, для чего особенно пригодно логарифмическое изображение или разделение на октавы (как в музыке). В этом случае представляется еще возможность ввести небольшое упрощение для наглядности графика.

Если за основную единицу мы возьмем какую-нибудь определенную длину волн, то длины волн нисходящих октав представят собою ряды: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024.

На десять октав волна увеличивается почти в тысячу раз. Чтобы не запутывать график сложными числами при дальнейшем увеличении октав, мы возьмем очень немного измененное чередование длин: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 125, 250, 500, 1000. Тогда получается то удобство, что через каждые десять октав соотношения повторяются; десятки октав дают простое соотношение между длинами волн, тогда как ошибка, делаемая нами, совершенно незаметна при графическом изображении (около 0,002 на каждую октаву).

В этом случае естественно взять основными единицами: 1 *км*, 1 *м*, 1 *мм*, 1 μ, 1 μμ.

Приложенная таблица-вклейка дает изображение длин волн, получаемых и наблюдаемых различными приемами[1]. Эти волны суть следующие:

	От	До
Динамомашина	∞	15 *км*
Электрические колебания (способ вращающегося зеркала)	600 *км*	0,06 *км*
Волны в проволоках	114 *м*	0,04 *м*
Зеркальные опыты	600 *мм*	3 *мм*
Неисследованная область	3 *мм*	0,06 *мм*
Термический способ (термобатарея или болометр)	60 μ	0,3 μ
Видимый спектр	0,76 μ	0,38 μ
Фотография	1,3 μ	0,1 μ
Начало неисследованной области	0,1 μ	—
Диаметр молекул	—	1 μμ

Таблица показывает нам, как наши сведения о волнах в эфире разрослись за истекшее столетие. В начале столетия были известны только те семь цветов радуги, которые уже знал первобытный человек; они составляют только одну октаву нашей шкалы. Постепенно эта область

[1] Для демонстраций в аудитории Московского университета, эта таблица начерчена на длинной полосе чертежной бумаги, подклеенной холстом (что в этом случае необходимо для прочности). Величина каждой октавы равна величине фортепианной октавы (16,5 *см*); длина всей таблицы около 8,5 *м*.

расширялась в ту и в другую сторону: с помощью фотографии и болометра мы расширили область нашего зрения; не довольствуясь теми колебаниями, которые дает светящее тело, сотрясающее еще не понятным нам образом эфир, мы при помощи динамомашин сначала научились искусственно производить периодические возмущения в эфире, а потом при помощи герцевского вибратора дошли до возможности по произволу вызывать эфирные волны различной длины.

Весьма вероятно, что недалеко уже то время, когда будет найден переход от наиболее коротких «искусственных» электромагнитных волн к наиболее длинным тепловым: тогда вопрос о длинных волнах до бесконечно длинных включительно (статическое электрическое или магнитное поле) будет решен. Для коротких волн условия совершенно иные; здесь нашим исследованиям положен предел — предел, обусловленный атомным строением материи. Где находится этот предел? Далеки ли мы теперь от него? Какой материал дадут эти короткие волны для изучения материи, а может быть и эфира? Это вопросы, на которые ответ может дать только будущее.

Москва. 1901.

21. ТЕРМОЭЛЕМЕНТЫ В ПУСТОТЕ КАК ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

В одном из прежних исследований относительно коротких электрических волн[1] я обратил внимание на то, что термоэлемент, находящийся в пустоте, обнаруживает при освещении значительно большую чувствительность, чем в воздухе.

Это явление без труда объясняется уменьшением в пустоте способности тел терять тепло согласно наблюдениям Кундта [1] и Варбурга[2] [1]. На более выгодное использование болометра в пустоте мимоходом указывал W. Wien [2][3], а в последнее время Kempf — Hartmann' ом[4] [3] было исследовано в пустоте расширение проволоки теплового гальванометра.

Значительные практические выходы термоэлементов в пустоте побудили меня вновь предпринять их исследование и провести его количественно. Это исследование охватывает как термоэлементы, которые по Nobili [4] — Melloni [1] (1835) служат для измерений со световыми и тепловыми лучами, так и такие термоэлементы, которые, по Klemenčič'у [1][5], употребляются для измерения электрических колебаний.

При всех исследованиях для выкачивания воздуха служил насос Kahlbaum'а. При самых высоких разрежениях остаток воздуха вытеснялся парами ртути, которые потом конденсировались при помощи твердой углекислоты[6]. Я позволяю себе здесь подчеркнуть, что к системе, из которой выкачивается воздух, необходимо должен быть присоединен осушающий

---

[1] P. Lebedev. Wied. Ann., **56**, p. 12, 1895.

[2] A. Kundt u. E. Warburg. Pogg. Ann., 156, p. 203, 1875.

[3] W. Wien. Ann. d. Phys., **5**, p. 425, 1901.

[4] Kempf-Hartmann. Physik. Z. S., 3, p. 109, 1901.

[5] I. Klemenčič. Wied. Ann., 42, p. 45, 78, 1892.

[6] Подробности относительно аппаратов и обращения с ними см. в моей работе в Ann. d. Phys., 6, p. 444, 1904.

сосуд с фосфорным ангидридом, так как следы водяного пара в вакууме уже сильно влияют на результаты[1].

Рис. 1 изображает два термоэлемента для измерения лучистой энергии. Термоэлементы платина — константан были скручены из проволок 0,025 *мм* в диаметре[2], платиновые концы были обвиты вокруг толстых платиновых подводок, а места, в которых были скручены проволочки, были гальванически покрыты платиновою чернью. Один термоэлемент находился

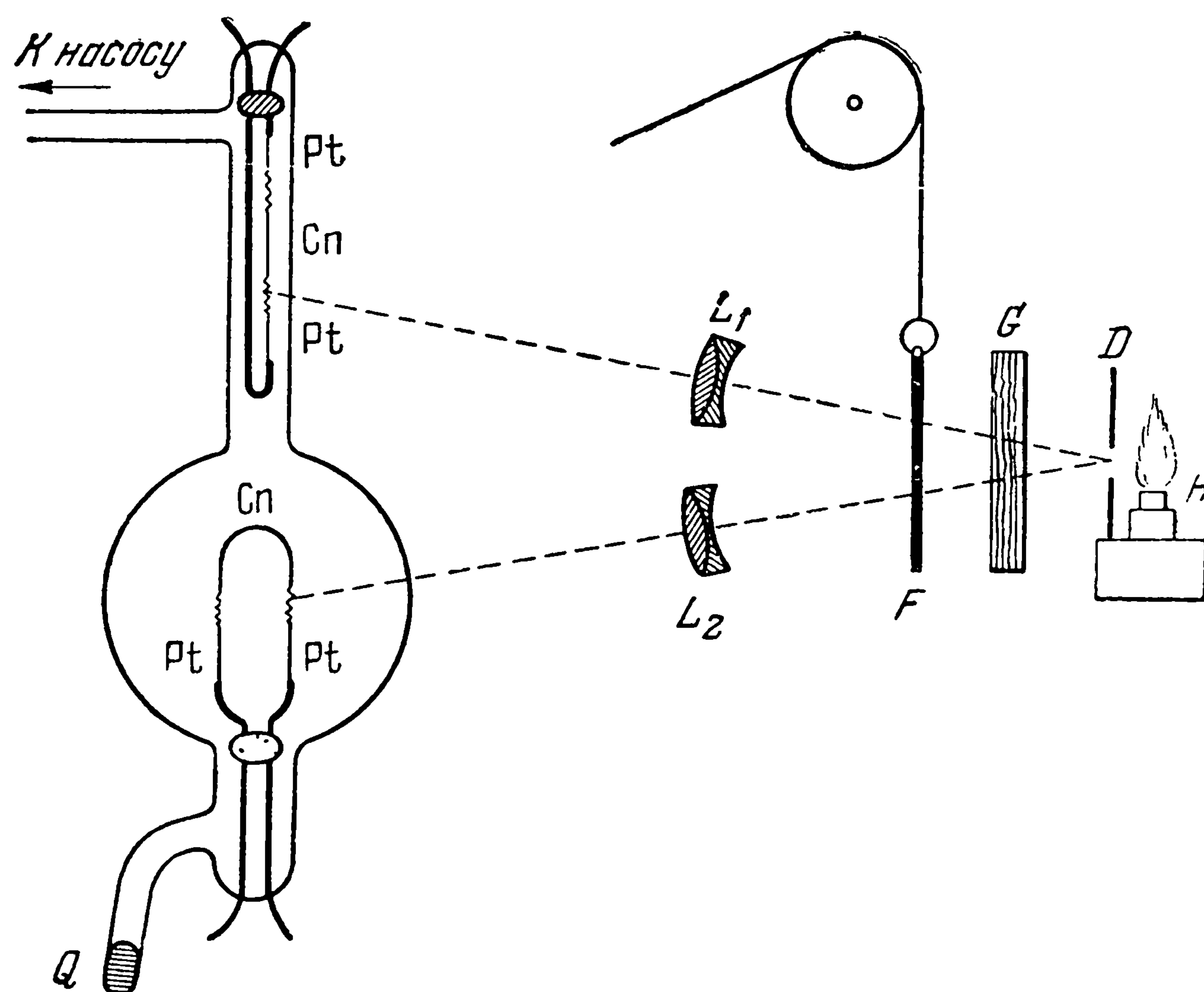


Рис. 1.

в узкой стеклянной трубке ($d = 8$ *мм*), другой в стеклянном шаре ($D = 5$ *см*). На этих термоэлементах можно было исследовать влияние размеров сосуда. Свет, который выходил из маленькой диафрагмы D, освещенной лампою Гефнера [5] H[3], проходил через толстую стеклянную пластинку G и мог быть закрыт при помощи подвижной ширмы F. При помощи линз L_1 и L_2 два действительных изображения диафрагмы концентрировались на одном из спаев термоэлементов. При помощи переключателя, не показанного на рис. 1 или один, или другой из термоэлементов мог включаться в цепь чувствительного гальванометра. В боковом придатке находилась капля ртути Q. Придаток можно было нагревать или охлаждать.

---

[1] См. также A. Kundt u. E. Warburg. l. c, p. 202.

[2] Получены от Hartmann u. Braun, Франкфурт-на-Майне.

[3] Чтобы избежать колебания пламени лампы Гефнера, на нее был надет маленький цилиндр из металлической сетки.

Рис. 2 представляет термоэлемент в пустоте, предназначенный для измерений электрических колебаний.

Термоэлемент сделан из платиновых и константановых проволок ($d = 0{,}025$ *мм*). Отклонение от первоначальной формы по Клеменчичу (l. c.) заключается лишь в том, что тонкая константановая проволока соединена в цепи гальванометра не прямо с толстою платиновою подводкою, а через посредство тонкой промежуточной платиновой проволоки; таким

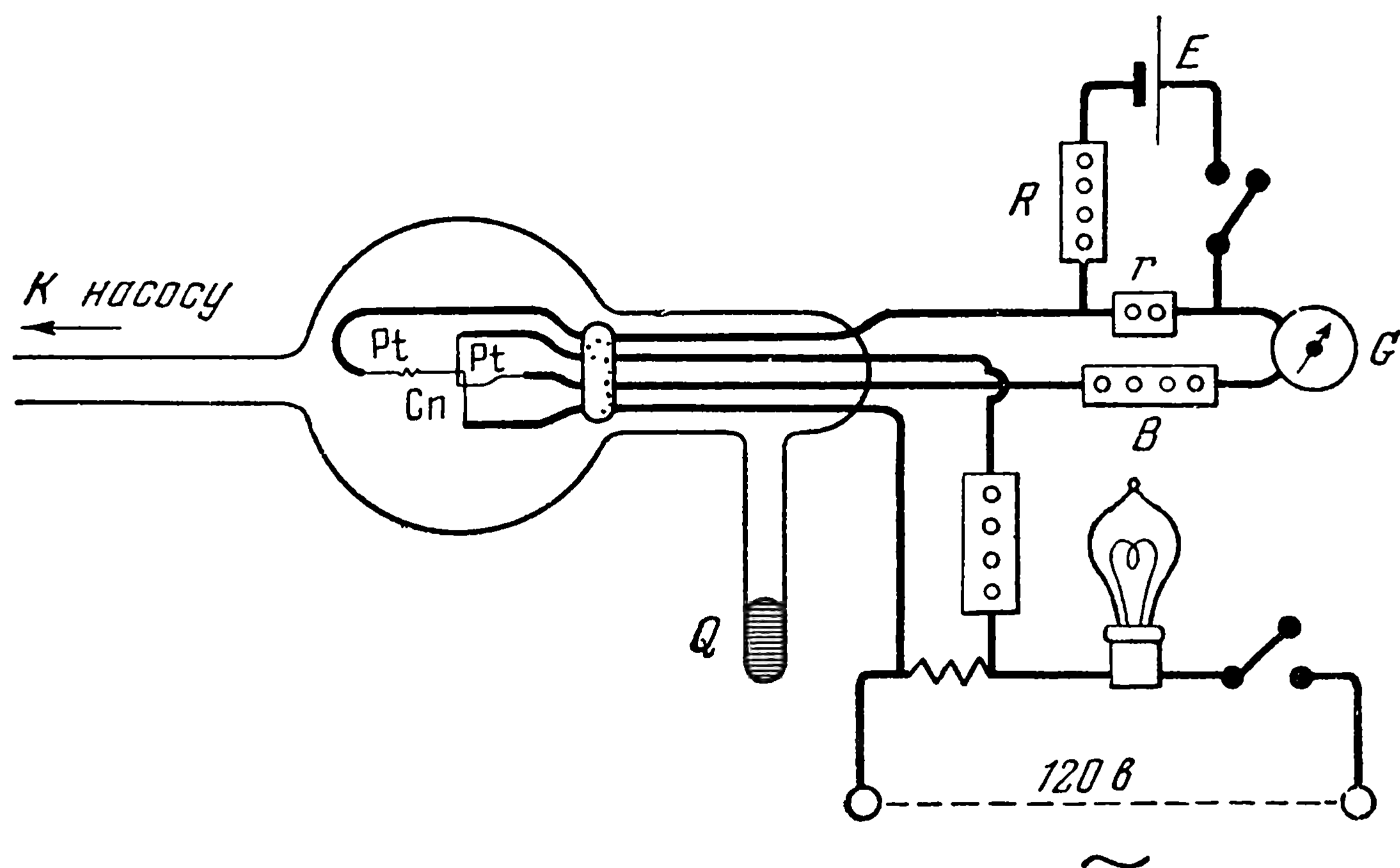


Рис. 2.

способом было уничтожено движение нулевой точки, происходящее от медленного теплового обмена в подводящих проводах. Весь аппарат был впаян в стеклянный шар ($D = 3$ *см*); в боковом придатке находилась капля ртути Q.

Нагревающий переменный ток (50 периодов) доставлялся городской центральной станцией и ослаблялся при помощи ответвлений и соответствующих балластных сопротивлений. Чувствительность гальванометра могла быть соответственно уменьшена (при сильном разрежении) при помощи балластного сопротивления R и измерена обычным способом при каждом ряде наблюдений, для чего устраивалось ответвление от нормального элемента E посредством сопротивлений R и r.

При всех исследованиях нагревание как при помощи освещения, так и при помощи переменного тока всегда производилось в продолжение одной минуты с последующими перерывами в одну минуту. При этом наблюдались стационарные отклонения гальванометра. Все наблюдения начинались и оканчивались при атмосферном давлении; отклонения гальванометра для этого давления служили единицей чувствительности для данного термоэлемента.

Таблица

Давление, *мм*	Платинированный элемент (освещение)		Не платинированный элемент (переменный ток)	Давление, *мм*	Платинированный элемент (освещение)		Не платинированный элемент (переменный ток)
	Шар	Трубка			Шар	Трубка	
760,0	1		1[1]	0,07	5	4,5	10
5,0	1		1	0,01	7	5,5	25
0,7	2		2	0,00011	7,4	6,0	33
0,2	3		6	Охлаждение твердым CO_2	7,4	6,0	34

[1] Отсчет по Mc-Leod-Kanlbaum' овскому измерителю давлений

Для каждого термоэлемента отдельные наблюдения различных рядов редуцировались к постоянной чувствительности гальванометра, затем наносились на ту же координатную бумагу и соединялись непрерывной кривой [1]. Результаты этих исследований приведены на рис. 3, где в качестве ординат нанесены отклонения гальванометра, а за абсциссы для большого удобства приняты логарифмы давлений [2]. Приведенная выше таблица представляет взятые из кривых результаты, которые имеют значение для изготовления термоэлементов.

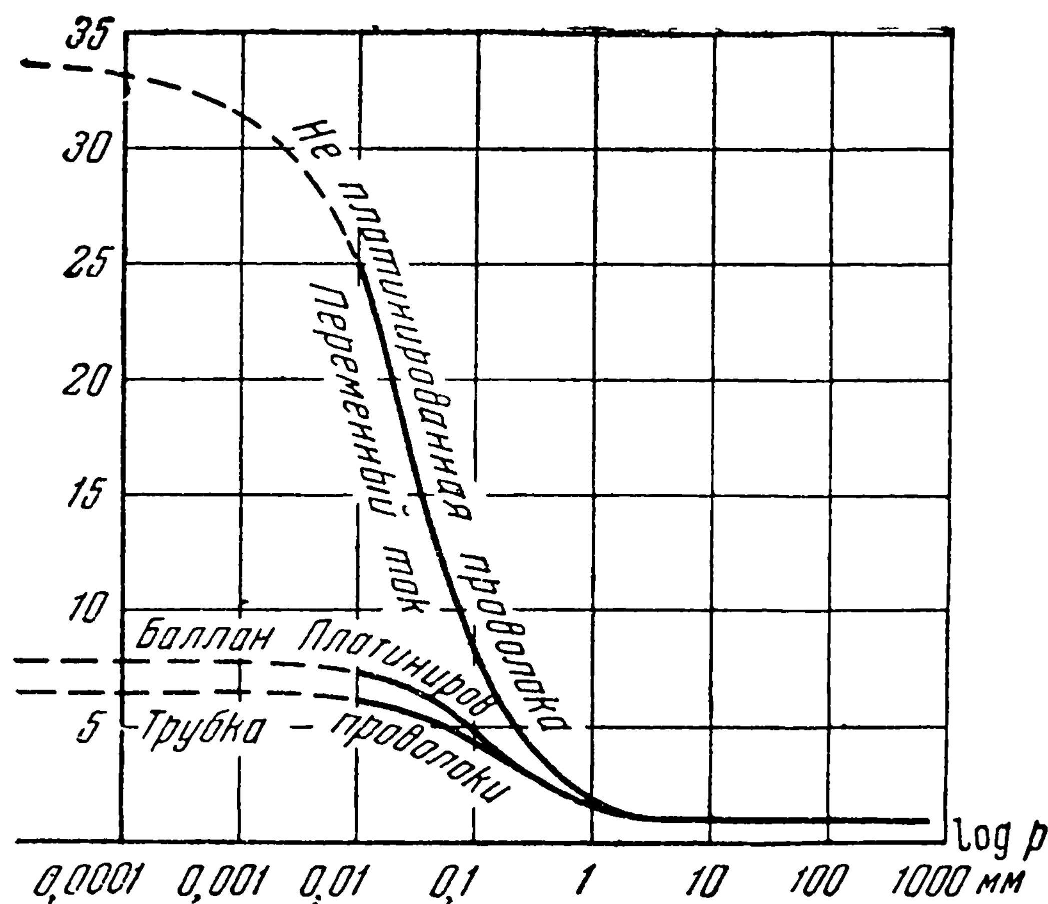


Рис. 3.

Из рис. 3 и из таблицы можно усмотреть следующее:

a) в области от одной атмосферы до 5 *мм* давления чувствительность не изменяется;

b) для меньших давлений чувствительность быстро возрастает с разрежением и достигает своего практического максимума около 0,01 *мм*, т. е. при таком давлении, при котором применение вмазанных окошек для пропускания исследуемых

[1] Все ряды наблюдений совпадали между собою в пределах 5%.

[2] Кривые начиная от давлений ниже 0,01 *мм* приведены лишь пунктиром, так как в этой области давления не могут быть определены с достаточною точностью.

лучей не представляет затруднения. Чувствительность возрастает в 7 раз для зачерненных и в 25 раз для незачерненных термоэлементов;

c) для разрежений, которые лежат ниже 0,01 *мм*, как это можно получить при помощи ртутного насоса и охлаждающих смесей, чувствительность растет сравнительно так медленно, что применение этих более высоких разрежений не представляет значительных практических выгод.

Повышенная чувствительность термоэлементов в пустоте и одновременно наблюдающаяся значительно большая устойчивость их дают возможность приняться за ряд таких исследований в области электромагнитных колебаний, к которым до сих пор нельзя было приступать.

Физическая лаборатория Университета.
Москва. Июнь 1902.

22. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ОТСТУПЛЕНИЯ ОТ ГРАВИТАЦИОННОГО ЗАКОНА НЬЮТОНА[1]

Вопросы об отступлениях от основного закона притяжения масс и о физических причинах, обусловливающих эти отступления, принадлежат к числу самых старых вопросов астрофизики — они старее, чем самый закон Ньютона; три столетия прошло с того времени, когда Кеплер впервые остановился на этих вопросах и указал на такое решение их, лучше которого мы и в настоящее время не можем найти. В самой резкой и притом наиболее простой форме это отступление от Ньютоновского закона сказывается в движении кометных хвостов, где оно проявляется в виде резко выраженной отталкивательной силы Солнца. История развития воззрений на природу этой отталкивательной силы Солнца и физическое обоснование этих воззрений принадлежат к наиболее интересным главам астрофизики: здесь мы можем проследить на протяжении трех столетий ту тесную связь, которая существует между астрономическими теориями и господствующими физическими представлениями[2].

Кеплер (1608) высказал предположение, что кометные хвосты суть газообразные испарения кометного ядра, которые движутся независимо от этого последнего и, в отличие от него, не притягиваются, а отталкиваются Солнцем; физическую причину этого отталкивания Кеплер искал в действии лучей Солнца: господствовавшей в его время теорией света была теория истечения, которая как к необходимому механическому следствию приводила к представлению, что лучи света давят на те тела, на которые

[1] Сообщение, сделанное на съезде Немецкого астрономического общества в Геттингене 4 августа 1902 г.

[2] История развития этих взглядов обстоятельно изложена у de Mairan [1]. Traité physique et historique de L'Aurore Boréale (Seconde édition). Paris, 1754; и F. Zöllner. Wissenschaftliche Abhandlungen, 2, Leipzig, 1878.

они падают; объяснение отталкивания кометных хвостов световым давлением не представляло никаких затруднений [2].

Ньютон[1] (1687) указал, что то̀ объяснение явления отталкивательных сил Солнца давлением его лучей, которое дал Кеплер, вполне допустимо, но сам он сделал попытку подвести отталкивание кометных хвостов под общий закон притяжения масс, полагая что в этом случае мы имеем дело лишь с «кажущимся» отталкиванием; Ньютон исходил из гипотезы, что мировое пространство заполнено газообразным веществом более плотным, нежели газы кометных хвостов: эти последние всплывают в окружающей среде (по закону Архимеда) и, следовательно, только кажущимся образом отталкиваются Солнцем.

Эйлер[2] (1744), видя все те затруднения, к которым ведет гипотеза Ньютона, снова обратился к данному Кеплером объяснению отталкивательной силы Солнца давлением его лучей. В качестве яркого противника гипотезы истечения в учении о свете Эйлер стал на точку зрения Гюйгенса[3], и предположил, что свет представляет собою продольное колебательное движение светового эфира; он обосновал явление светового давления, рассматривая это последнее как результат беспрерывного ряда механических толчков, которые производят продольные колебания света при падении на поверхность какого-либо тела[4].

Около половины восемнадцатого столетия, приблизительно за 35 лет до того, как Кэвендишу [3] (1789) впервые удалось в лаборатории наблюдать притяжение масс, де Мэран и Дюфе[5] [1] (1754) делали первые попытки непосредственно опытным путем исследовать давление световых лучей; свои опыты де Мэран и Дюфэ проводили замечательно остроумным способом, но они натолкнулись на такие затруднения (вихри в нагретом воздухе), которые для экспериментальных средств восемнадцатого столетия оказались непреодолимыми, и должны были оставить вопрос о существовании светового давления открытым.

В девятнадцатом веке общий интерес к изучению движения комет был привлечен знаменитыми исследованиями Ольберса [4] (1812); он указал, что с отталкиванием, которое производит Солнце на хвосты комет, надо считаться, как с явлением, непосредственно вытекающим из всех наблюдений; что касается до объяснения физической причины этого отталкивания, то Ольберс[6] отверг объяснения, данные Кеплером и Ньютоном, как гипотезы, опытом не доказанные, и с своей стороны в очень осторожной форме

---

[1] I. Newton. Principia philosophiae naturalis mathematica. Lib. 111. London, 1687.

[2] L. Euler, см. Zöllner, l. c. p. 525.

[3] L. Euler. Histoire de l'Académie Royale de Berlin, **2**, p. 121, 1746.

[4] На существование таких сил в случае продольных (акустических) волн недавно (Phil. Mag., 1902. March) указывал лорд Рэлей. Экспериментально они были обнаружены гораздо ранее Дворжаком (Pogg. Ann., **157**, p. 42, 1876) для звуковых волн.

[5] De Mairan et du Fay, см. De Mairan, l. c., p. 371.

[6] W. Olbers. Leben und Werke, **1**, p. 331. Berlin, 1894.

высказал новое предположение. «Трудно удержаться, говорит он, чтобы в этом случае не подумать о чем-либо аналогичном нашим электрическим притяжениям и отталкиваниям». Если мы будем иметь в виду, что Ольберс высказал свое предположение во время первых триумфов электрических исследований, то станет легко понятным сведение отталкивательной силы Солнца к силам электрическим, закон дальнодействия которых уже был установлен непосредственными опытами Кулона (1785).

«Электрическая» теория Ольберса стала господствующей: свойства электрических сил убывать пропорционально квадрату расстояния (свойство, которое присуще также и силам светового давления) оказалось достаточным для построения простой теории кометных хвостов, которая была дана Бесселем [5][1] и позволяла определять абсолютную величину отталкивательной силы Солнца на кривизны кометных хвостов; из измерений большого числа кометных хвостов Ф. А. Бредихин[2] [1] определил величины отталкивательных сил и нашел, что они являются характерными постоянными различных веществ, находящихся в хвостах комет; абсолютные величины отталкивательных сил (по сравнению с силою притяжения) Ф. А. Бредихин нашел равными 0,2; 1,1 и 17,5.

«Электрическая» теория Ольберса опирается на две гипотезы: во-первых, что на Солнце находится постоянный электрический заряд, и, во-вторых, что отдельные молекулы газов хвоста при их выделении из кометного ядра получают электрические заряды, одноименные с зарядом Солнца. За время существования этих гипотез физическое обоснование их не сделало сколько-нибудь заметных успехов: предположение, что на Солнце находится электрический заряд, удается привести в связь с магнитными явлениями на Земле, лишь прибегая к добавочным гипотезам; впрочем, до сих пор не удалось определить не только абсолютной величины заряда Солнца, но и даже знака его. Что касается до электризации отдельных молекул при тех условиях, при которых, согласно второй гипотезе, она должна иметь место, то такого рода электризации физики и по сей день не могли подметить в своих лабораторных опытах.

Чтобы доказать существование электризации газов хвоста, часто указывают на сходство свечения кометных хвостов со свечением в гейслеровских трубках; такой способ доказательства не выдерживает критики и противоречит принципу сохранения энергии, согласно которому всякое свечение сопряжено с отдачей энергии, а таковое не может иметь места в случае электростатически неизменно заряженных газовых молекул; причину свечения кометных хвостов следует искать во флуоресценции[3]

---

[1] Bessel. Astronom. Nachr., 13, p. 185, 1836.

[2] Th. Bredichin. Annales de l'observ. de Moscou, (2) 1, p. 45, 1886.

[3] Кроме флуоресценции, в сильно разреженных газах при освещении возможны излучения в связи с резонансом; для электромагнитных резонаторов, находящихся в поле электромагнитных волн, такие излучения предсказываются теорией и обнаружены также на опыте.

сильно освещенных газов, которую непосредственно опытным путем исследовали Ломмель[1] [1], Видеман [1] и Шмидт[2] [6].

Насколько серьезны те возражения, которые можно сделать против существования приведенных выше электрических гипотез, указал сам Цельнер[3] [1], которому физическое обоснование электрической теории обязано более, чем кому-либо другому: он заявил, что отступится от электрической теории, коль скоро будет доказано, что лучи Солнца могут производить давление на освещаемые ими тела.

Существование давления света было обосновано (совершенно независимо от каких-либо астрофизических теорий) тридцать лет тому назад Максвеллом[4] как следствие электромагнитной теории света, а также Бартоли [1] (1876) как следствие второго принципа термодинамики[5]; эти теоретические исследования приводят к тождественному результату, что силы светового давления непременно должны существовать и что они связаны простым соотношением с количеством энергии E, падающей в секунду в форме параллельных лучей на данное тело. Давление p, производимое светом на поглощающую его поверхность тела, определяется так:

$$p = \frac{E}{v},$$

где v — скорость света.

Солнечные лучи на расстоянии Земли от Солнца давят на поглощающую поверхность в 1 *м*^{2} с силою, равною весу 0,5 *мг*.

За последнее время удалось мне[6], а также Никольсу [1] и Гуллю[7] [7] непосредственными лабораторными опытами констатировать действительное существование светового давления, причем соотношение, данное Максвеллом и Бартоли, оказалось количественно имеющим место.

Задолго перед тем, как появились эти опытные исследования, Фитцджеральд[8] [8] уже приложил теоретические исследования Максвелла к объяснению отступлений от ньютоновского закона всемирного тяготения в случае движения комет; но он сделал при этом принципиальную ошибку: он распространил добытые им результаты на отдельные молекулы кометных хвостов, не приняв во внимание, что выводы Максвелла относятся только к телам, размеры которых велики по сравнению с длиною волн падающих на них лучей. От этой ошибки свободны соображения, выска-

---

[1] E. Lommel. Wied. Ann., 19, p. 356, 1883.

[2] E. Wiedemann und G. C. Schmidt. Wied. Ann., 56, p. 18, 1895; 57, p. 447, 1896.

[3] F. Zöllner. Über die Natur der Kometen, p. 198. Leipzig, 1872.

[4] J. C. Maxwell. Treatise on Electricity and Magn. § 792, 1873.

[5] A. Bartoli. Nuovo Cimento, 15, p. 195, 1883.

[6] P. Lebedew. Ann. d. Phys., (4) 6, p. 433, 1901, а также ЖРФХО, 33, p. 53, 1901.

[7] F. Nichols a. Hull. Physic. Rev., 13, 307, 1901.

[8] Fitzgerald. Proceed. Roy. Soc. Dublin, 3, p. 344, 1883.

занные одновременно Лоджем[1] и мною[2] относительно отталкивательной силы Солнца, а также соображения, сделанные мною[3] относительно деформаций и исчезновений кометных ядер, тогда как Аррениус[4] [9], развивая основы своей теории солнечной короны, снова сделал эту ошибку.

Общее притягательное действие солнца (F) на шаровидное тело, размеры которого велики сравнительно с длинами волн падающих на него солнечных лучей, может быть выражено в гравитационных единицах следующим образом[5]:

$$F = 1 - \frac{10^{-4}}{r\delta},$$

где r — радиус шара, выраженный в см,
δ — плотность тела (по отношению к воде).

Отсюда сразу видно, что для тела, размеры которого более 1 *см*, отступления от Ньютоновского закона всемирного тяготения исчезают в пределах ошибок наблюдений самых точных астрономических измерений. Если кометное ядро состоит из роя метеоритов, размеры которых меньше 1 *см*, то при выгодных условиях наблюдения кометы отступления от закона Ньютона как раз еще можно обнаружить; если размеры метеоритов роя еще меньше, то отступления от упомянутого закона будут соответственно больше. Можно, однако, наоборот, утверждать, что в том случае, когда отступлений от закона Ньютона не наблюдается и предел ошибок наблюдений известен, размеры метеоритов кометного ядра не могут быть меньше известной величины.

В том случае, когда кометное ядро представляет собою рой достаточно малых метеоритов, размеры которых неодинаковы, это кометное ядро будет непрерывно деформироваться и расплываться, что при периодических кометах должно сказаться особенно сильно. Обычным способом наперед вычисленная из имеющихся наблюдений дальнейшая орбита должна очень сильно расходиться с орбитою, впоследствии наблюдаемою; может быть, этим способом можно объяснить особенности в явлениях движения Бьелидов.

На пылинки, размеры которых измеряются тысячными долями миллиметра и которые, следовательно, сравнимы с длинами волн, падающих

---

[1] O. Lodge. Nature. Sept., p. 454, 1891.

[2] P. Lebedew. Wied. Ann., 45, p. 292, 1892.

[3] P. Lebedew. Rapports préentés an Congrés International de Physique á Paris, 2, p. 133, 1900; ЖРФХО (ч. физ.) 32 (1), p. 211—217, 1900. В прим. к стр. 216 говорится следующее: «Частички еще меньшие или отдельные газовые молекулы Солнце будет, вероятно, отталкивать, но как подсчеты Maxwell'а—Bartoli, так и наши опыты относятся только к случаю, когда тело велико сравнительно с длиною волны падающих на него лучей».

[4] S. Arrhenius. Physik. Zeitschr., 2, p. 81. 1900.

[5] P. Lebedew, Wied. Ann., 45, p. 294, 1892. На нешарообразные тела солнечные лучи оказывают большое давление, так как у них отношение поверхности к объему больше.

на них лучей Солнца, приведенная выше формула не может быть распространена: Шварцшильд[1] [10] показал, что в этом случае отталкивательная сила Солнца при известных размерах пылинок достигает максимальной величины и затем быстро падает при дальнейшем уменьшении их размеров.

Когда солнечные лучи падают на отдельные молекулы газа, то в этих последних имеет место явление резонанса, сопровождаемое давлением падающих на них лучей, что мною[2] было указано. В этой области, которая представляет собою наибольший интерес для астрофизики, необходимо еще ожидать появления соответствующих непосредственных экспериментальных исследований.

Обращаясь к истории развития наших представлений о физической причине отступлений от ньютонова закона всемирного тяготения, мы видим, что то представление о ней, которое три столетия тому назад высказал Кеплер, и которое сперва было оттеснено гипотезою «всплывания» Ньютона, а затем электрической гипотезой Ольберса, в настоящее время снова выступает на передний план, опираясь теперь, с одной стороны, на теоретические обоснования Максвелла и Бартоли, а с другой — на непосредственные опытные исследования. Представление Кеплера является нам сейчас в форме физически обоснованной теории: мы должны теперь утверждать, что Солнце обладает отталкивательной силой; из наших лабораторных опытов мы знаем, как велики силы давления, производимого светом на разные тела, и можем наперед количественно указать то отступление от закона Ньютона, которое непременно должно существовать, и разобрать те следствия, которые отсюда проистекают.

Вопрос о том, существуют ли электрические силы, которые в том или другом случае обусловливают заметные отступления от закона Ньютона,— этот вопрос в настоящее время является открытым: только после того как мы количественно приняли в расчет силы светового давления, которые безусловно существуют, и выделили их, только тогда мы можем дать себе отчет, существует ли еще какая-нибудь добавочная сила, которая заставляла бы нас делать новые гипотезы, или же представление Кеплера исчерпывает все особенности наблюдаемого отступления от закона Ньютона.

Москва. Октябрь 1902.

---

[1] K. Schwarzschild. Berd. d. Münch. Akad. d. Wiss., 1901; p. 293, 1897.

[2] P. Lebedew. Wied. Ann., **62**, p. 170—172, 1897. В случае газов величина светового давления равняется количеству поглощенной энергии, разделенной на скорость света; отношение между коэффициентом поглощения и массою газа очень различно для различных газов.

23. ОБ ОДНОМ ВИДОИЗМЕНЕНИИ ОПЫТА РОУЛЕНДА — ГИЛЬБЕРТА

Интересные опыты, которые Гильберт[1] [1] поставил по предложению Роуленда [2] с тою целью, чтобы возбудить в проводниках электрические токи посредством движения этих проводников в эфире и таким образом найти такое объяснение причин земного магнетизма, которое было бы экспериментально обосновано,— эти опыты, как известно, не дали положительного результата.

Так как ожидаемый эффект должен быть пропорционален скорости проводника, то я попытался заменить ту небольшую скорость, которой

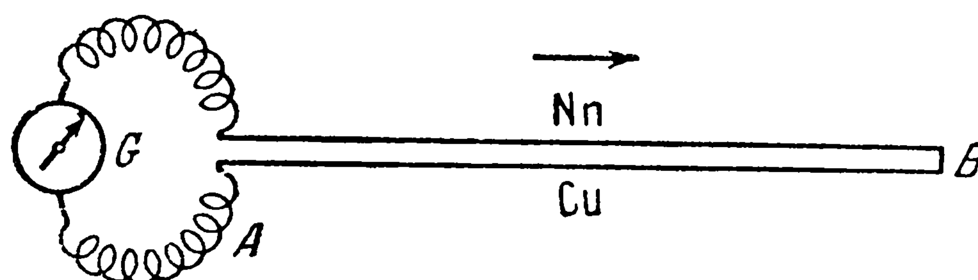


Рис. 1.

можно достигнуть в лаборатории, в тысячу раз большей скоростью движения Земли по орбите (30 *км/сек*). В основании выбранного мною расположения опыта лежит гипотеза Роуленда, что на концах линейного проводника, движущегося по направлению своей длины (в эфире), возникает разность потенциалов, а также и вспомогательная гипотеза, что эта разность потенциалов при одинаковых условиях различна для химически различных проводников; поэтому, если поставить две параллельных проволоки равной длины из меди Cu и никелина Nn (рис. 1) по направлению

---

[1] N. Gilbert. Phil. Mag., (6) 3, p. 361, 1902.

движения Земли по орбите и соединить между собою два их соседних конца, то между двумя другими соседними концами должна возникнуть постоянная разность потенциалов, которая вызовет непрерывно длящийся ток в гальванометре G.

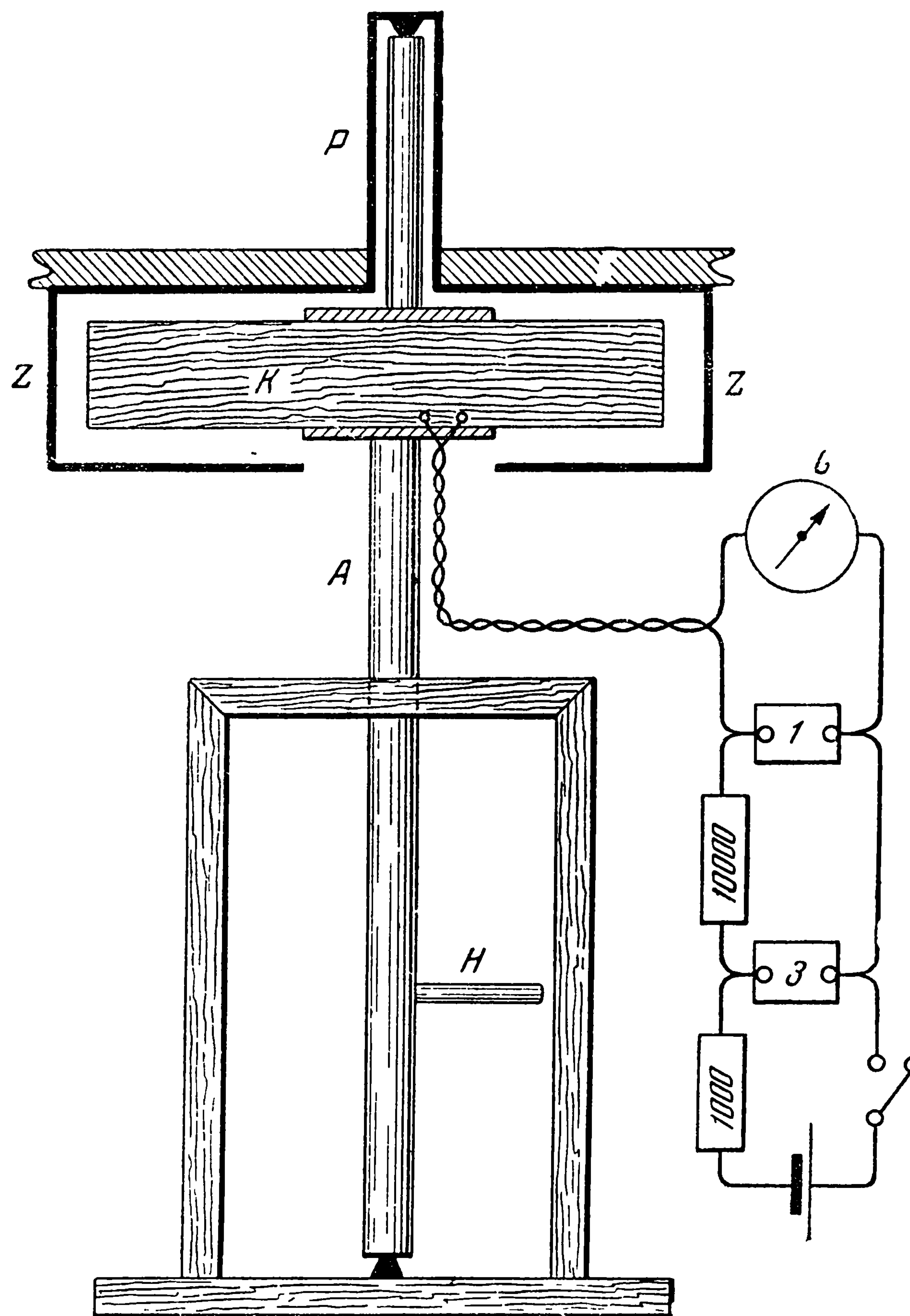


Рис. 2.

Для опытов были взяты 500 медных проволок (толщина 1,5 *мм*) и 500 никелиновых проволок (толщина 2,35 *мм*) длиною по 75 *см* каждая; они были соединены последовательно, как элементы термоэлектрического столбика Меллони, и заключены в толстостенный деревянный ящик K (рис. 2); гибкий двойной провод L вел к гальванометру G. Ящик

K сидел на вертикальной оси *A* и мог повертываться при помощи рычага *H* по всем направлениям компаса; на ящике находилась цапфа *P*, на которой могла вращаться непрерывно и независимо от ящика почти со всех сторон замкнутая цинковая оболочка *ZZ*; эта оболочка *ZZ* (на рис. 2 в разрезе) приводилась во вращение мотором; было обнаружено, что после пятичасового вращения температура внутри ящика *K* достаточно выравнялась и разность изменений температуры на двух концах пучка проволоки едва достигала 0,02° C в 1 *час*.

Общее сопротивление проволок равнялось 35 *ом*, сопротивление гальванометра 80 *ом*; для определения чувствительности гальванометра было введено в цепь сопротивление в 1 *ом* (рис. 2), на концы которого можно было налагать электродвижущую силу в $6 \cdot 10^{-7}$ *в* (отклонение гальванометра около 10 делений шкалы).

Чтобы исключить всегда имеющиеся налицо термоэлектрические силы, отсчеты гальванометра проводились при определенном положении ящика *K*, и затем ось *A* повертывалась на 180°; от 10 до 30 отсчетов, отделенных друг от друга равными промежутками времени (30 *сек*), составляли один ряд наблюдений.

Наблюдения были проведены в декабре 1902 г. в полуденное время; направление *NS* совпадает в это время с направлением слагающей движения солнечной системы, а направление *OW* — с направлением движения Земли по орбите.

Шесть окончательных рядов наблюдений согласно показывают, что электродвижущая сила, превышающая $3 \cdot 10^{-8}$ *в*, чему соответствует разность температур спаев в $3 \cdot 10^{-6}$° C, не могла быть обнаружена этими опытами.

Физическая лаборатория Университета.
Москва. Февраль 1903.

24. ОБ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Одним из назревших вопросов физики Солнца является вопрос о температуре солнечных пятен; температура пятна может быть определена из измерений распределения энергии в его спектре. Ввиду того, что полное исследование спектра требует применения довольно сложных способов наблюдения (спектроболометра), было бы особенно желательным сделать предварительные исследования и первое грубое определение абсолютной температуры пятен при помощи обыкновенных спектрографов.

Наблюдения могли бы быть проведены следующим образом: закрывая нижнюю и верхнюю часть щели спектрографа, на среднюю часть ее проектируют солнечное пятно и экспонируют фотографическую пластинку в течение определенного времени, необходимого для нормального зачернения пластинки в данной части спектра; потом закрывают среднюю часть щели и, открывая нижнюю и верхнюю ее части, заставляют падать свет от источника известной температуры (для предварительных опытов — от яркой поверхности Солнца), подбирая время экспозиции таким образом, чтобы зачернение пластинки (которое легко определяется фотометром) в той же части спектра было бы приблизительно равно зачернению от света пятна: отношение времени экспозиции дает отношение яркостей данного района спектра у тел известной температуры (поверхности Солнца) к яркости пятна в том же районе спектра [1]. Подобное измерение повторяют для четырех или пяти районов спектра (от крайнего красного до ультрафиолетового конца его) и вычерчивают кривую распределения энергии в спектре пятна. Такая кривая представляет собою спектр собственного света пятна с наложенным на него спектром диффузного солнечного света. Исследования спектра твердого тела позволяют в полученной нами кривой отделить друг от друга налагающиеся спектры и определить абсолютную температуру солнечного пятна.

Фотографический метод наблюдения яркости спектра позволит особенно резко выделить диффузный свет в области коротких волн, где излучение

самого пятна сравнительно мало. При точном определении абсолютной температуры пятна особенно важно фотометрировать красную и ультракрасную часть его спектра, для чего фотографическую пластинку спектрографа придется заменить спаем термоэлемента[1]; само собою разумеется, что в этом случае для сравнения удобно будет фотометрировать такой источник света, температура которого по возможности близка к температуре пятна и может быть измерена одним из известных способов.

Возможно, что впоследствии, когда вопрос о примесях диффузного света к свету пятна будет выяснен, температуру пятна можно будет определять быстро и с достаточной степенью точности с помощью прибора, подобного оптическому пирометру Wanner'a [2], которым пользуются для определения температуры поверхностей раскаленных тел.

Систематическое исследование температур пятен может дать ценный материал для выяснения природы этих пятен. Это один из частных вопросов, разработка которого может быть полезной для целей комиссии.

---

[1] Прибор, удобный для такого рода измерений, вырабатывается в настоящее время в Физическом институте Московского университета.

25. ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ СПОКОЙСТВИЯ И ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

До настоящего времени спокойствие и прозрачность атмосферы во время солнечных наблюдений определяется субъективно и характеризуется выражениями вроде «довольно спокойно» или «легкая дымка» и т. д., которые могут иметь значение лишь для сравнительной оценки разновременных наблюдений одного и того же наблюдателя. Для сравнения условий наблюдений в двух различных точках Земли и, в еще большей мере, для проектирования таких новых наблюдений, которые лежат на границе доступного нашим оптическим средствам, такие качественные характеристики недостаточны и должны быть заменены количественными. Эти количественные характеристики суть:

1) неспокойствие атмосферы, которое может быть измерено числом дуговых секунд амплитуды дрожания нижнего края Солнца;

2) прозрачность атмосферы, которая может быть измерена отношением силы света неба в непосредственной близости Солнца к силе света, рассеянного белой матовой поверхностью при нормальном ее освещении солнечными лучами света в красной части спектра от 650 до 750 $\mu\mu$.

Прибором для измерения неспокойствия атмосферы может служить сильный окуляр, снабженный солнечным стеклом и стеклянным микрометром, на котором нанесены три параллельные черты на расстояниях пяти секунд дуги (для данного рефрактора).

Для определения яркости неба должен служить особый фотометр. Ввиду того, что задача такого фотометрирования состоит только в определении порядка величины яркости, точность измерений в $\pm 15\%$ вполне достаточна и может быть достигнута очень простым прибором.

Настоящая заметка имеет целью обратить внимание комиссии на назревшую потребность астрономической практики и на основные положения для ее удовлетворения.



26. СИЛЫ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

I. ИСТОРИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Предположение, что свет оказывает давление, было впервые высказано почти триста лет назад Кеплером, который применил его к объяснению отталкивательного действия, оказываемого Солнцем на кометные хвосты; эмиссионная теория света, господствовавшая во времена Кеплера, служила механическим обоснованием его предположения.

Через полтораста лет Эйлер вывел силы светового давления как механическое следствие теории света Гюйгенса в предположении, что свет представляет колебательное движение с продольными перемещениями в световом эфире.

Почти одновременно де Меран [1] и Дюфе [1] с необычайным искусством осуществили первые попытки ответить путем непосредственного эксперимента на вопрос о существовании силы светового давления; но встретившиеся им трудности (воздушные течения) не могли быть преодолены экспериментальными средствами восемнадцатого столетия, и поэтому их опыты не дали решающего результата.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

За последние тридцать лет теоретическая предварительная работа, направленная на изучение давления, оказываемого лучистой энергией, шла впереди экспериментальных исследований и дала простое соотношение, связывающее силы этого давления с плотностью энергии излучения в пространстве.

Если не считать упомянутых теоретических исследований Эйлера, то впервые Максвелл установил существование сил светового давления, обосновав его как необходимое следствие созданной им электромагнитной теории света, причем он исследовал пондеромоторные силы, обнаруживающиеся в переменном электромагнитном поле пучка лучей; Максвелл

дал также первое количественное определение величины силы давления для солнечного излучения.

Такому же способу вывода сил давления из электромагнитной природы света следовали Хевисайд [1], Лорентц, Кон [1] и Лармор [2]; подробное рассмотрение этого вопроса можно найти у Гольдгаммера, который обстоятельно исследовал ряд частных случаев, где обнаруживаются силы светового давления.

Исходя из совершенно иной точки зрения и, по-видимому, не зная вывода Максвелла, Бартоли [1] разработал термодинамическую теорию сил лучистого давления; он указал на такие круговые процессы, при которых возможен переход лучистого тепла от более холодного тела к более теплому при посредстве подвижных отражающих поверхностей; работа, которая должна получиться в этом случае, вычисляется на основании второго начала (термодинамики), и отсюда может быть выведено обратное давление излучения на движущуюся поверхность.

Больцман развил дальше выводы Бартоли, применил их к явлениям излучения при различных температурах и вывел закон излучения Стефана [3] в предположении о существовании сил Максвелла — Бартоли; на основании этого предположения В. Вин [1] установил позднее свой «закон смещения». Этими исследованиями была заложена основа объяснения явлений излучения с точки зрения термодинамики.

Термодинамической точки зрения на давление лучистой энергии держались, вслед за Бартоли и Больцманом, Голицин и Гильом; Друде [1] дал широкий обзор этого вопроса и подробно объяснил значение сил светового давления для законов излучения.

Почти одновременно с Максвеллом и Бартоли, Тольвер Престон [4] высказал предположение, что световые лучи должны оказывать давление и что эти силы светового давления следует рассматривать, как частный случай сил, которые должны возникать в виде необходимого механического следствия при всякого рода волновых движениях. В новейшее время лорд Рэлей и Лармор независимо друг от друга дали, исходя из принципов механики, самое общее доказательство того, что всякое волновое движение, независимо от специальной формы, в которой проявляется его физическая природа, производит давление на все тела, препятствующие его свободному распространению, и, стало быть, это свойство присуще как свету, так и звуковым и водяным волнам.

Все эти теоретические исследования дают количественно совпадающие результаты. При падении нормально к плоскости поверхности, пучок параллельных лучей, которые распространяются со скоростью v и несут с собою количество энергии E в секунду, оказывает на эту поверхность, если принять ее отражательную способность равной ρ, давление p

$$p = (1 + \rho)\frac{E}{v}.$$

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Со времени упомянутых попыток де Мерана и Дюфэ не было недостатка в усилиях, направленных к исследованию механических действий света; но все эти исследования приводили к одному и тому же результату, именно, что наблюдаемые силы, возникающие при облучении тел, имеют вторичную природу и обусловливаются течениями в окружающем, неравномерно нагретом газе. Эти наблюдения были расширены блестящими исследованиями Крукса и завершены открытием радиометрических сил; источник этих сил в окружающем остаточном газе, они зависят от давления газа, от сторон сосуда и крыльев и при некоторых обстоятельствах могут превышать во много тысяч раз силы Максвелла — Бартоли, обусловленные непосредственным давлением излучения.

С одной стороны, то значение, которое приобрели в последние годы силы давления лучистой энергии Максвелла — Бартоли как для законов черного излучения, так и для применения в астрофизике, с другой,— усовершенствованные вспомогательные средства, имеющиеся сейчас в распоряжении экспериментатора, дали повод к тому, чтобы усиленно развивать экспериментальные исследования сил светового давления. Опыты в этом направлении были поставлены почти одновременно мною, затем Никольсом [1] и Гуллем [1]. Цель и тех и других исследований состояла в том, чтобы, с одной стороны, измерить в механической мере силы давления, с которыми пучок лучей, падающих от дуговой лампы, действует на крыло, висящее на крутильных весах; с другой стороны, измеряется интенсивность пучка падающих лучей калориметрическим методом и определяется отражательная способность крыла, откуда может быть вычислена величина сил давления по Максвеллу — Бартоли. После этого значения, полученные непосредственно из наблюдения, могут быть сравнены с вычисленными.

При проведении этих опытов применялись, однако, различные методы.

В моих опытах я обращал самое большое внимание на то, чтобы провести измерения в возможно простых условиях, которые притом не вызывали бы никаких сомнений. Были приняты все меры, чтобы сделать радиометрические силы как только можно малыми: разрежение газа было доведено до крайнего предела, крылья состояли из тонкого листового металла и сосуд был достаточно велик; путем контрольных опытов с крыльями различной толщины я убедился в том, что возникающие радиометрические силы исчезающе малы и что они, следовательно, не имеют влияния на наблюдаемые отклонения крутильных весов. Влияния конвекции, которые сказываются даже при крайних разрежениях и которые увеличивают отклонения в одну сторону, исключались тем, что пучок лучей падал поочередно то с одной, то с другой стороны крыла: поверхности обеих сторон крыла были совершенно одинаковы по свойствам и наблюдались длительные (статические) отклонения. Опыты, проведенные

в белом, красном, голубом свете, дали согласие между собой результаты. Определение отражательной способности крыла связано в моих опытах с некоторой неточностью, так как эти определения проводились путем фотометрических измерений в «белом» свете и дают количества света, отражаемые при опытах со световым давлением, лишь приблизительно. Количества энергии излучения определялись калориметрическим способом.

Если мы обозначим через 1 величину давления, которое по Максвеллу — Бартоли оказывает данный пучок лучей на абсолютно черное крыло, то мои измерения, отнесенные к крыльям: вполне поглощающему, металлически отражающему и прозрачному — дали следующие результаты

	Наблюденные	Вычисленные
Крыло, покрытое платиновой черныо . .	1,1	1,0
Платина полированная	1,8	1,6
Алюминий полированный	1,9	1,8
Никель полированный	1,4	1,6
Слюда полированная	0,1	—

Согласие в пределах возможных ошибок наблюдений (максимум до 20%) получается полное, и, таким образом, количественно установлено существование сил давления Максвелла — Бартоли.

Совершенно иным способом старались обойти затруднения, связанные с влиянием радиометрических сил, Никольс и Гулль. Основываясь на известном наблюдении Крукса, что при некотором давлении газа знак радиометрической силы может изменяться, Никольс и Гулль эмпирически определили для своего прибора то разрежение, при котором стационарное отклонение крыла близко к тому, которое следует из теории Максвелла — Бартоли, и потому радиометрические силы практически равны нулю; при этом разрежении (приблизительно 16 *мм*) они проводили свои наблюдения, мгновенно освещая крыло крутильных весов через каждые 6 *сек*, причем они предполагали, что и в первые мгновения облучения радиометрические силы остаются близкими к нулю, как это имеет место при длительном воздействии лучей. В качестве крыльев Никольс и Гулль применяли посеребренные покровные стеклышки и освещали их попеременно то со стороны серебра, то со стороны стекла. При этом применялись пучки лучей различного спектрального состава: излучение, идущее непосредственно от стеклянного конденсора дуговой лампы, и затем то же излучение после прохождения через красное стекло и через слой воды; для каждого рода излучения точно определялась отражательная способность крыла как на серебряной, так и на стеклянной стороне. Энергия излучения измерялась калориметрическим способом.

Из большого числа наблюдений в пересчете на постоянную энергию излучения получились средние значения для непосредственно наблюдаемых

сил давления и для тех сил, которые были выведены по Максвеллу — Бартоли из калориметрических измерений и измеренной отражательной способности. Для посеребренных покровных стеклышек получилось:

	Наблюденные, 10^{-5} *дин*	Вычисленные, 10^{-5} *дин*
Непосредственное излучение	7,01±0,02	7,05±0,03
Красное стекло	6,94±0,02	6,86±0,03
Слой воды . . .	6,52±0,03	6,48±0,04

Теория Максвелла — Бартоли подтверждается, таким образом, количественно в пределах возможных ошибок.

Описанные исследования относятся к силам, возникающим при излучении, нормальном к поверхности; Пойнтинг [5] дополнил эти опыты в том отношении, что рассмотрел случай падения пучка лучей наклонно к поглощающей поверхности; в этом случае точная сила давления разлагается на две составляющих, из которых одна направлена нормально, а другая тангенциально к поверхности; Пойнтинг закрепил поглощающее (покрытое сажей) крыло перпендикулярно коромыслу весов и направил пучок лучей под 45° к крылу; при такой постановке опыта вращение может быть вызвано только тангенциальной составляющей; из наблюдаемого отклонения энергия падающего пучка лучей была найдена равной $5{,}8 \cdot 10^{-6}$ *кал/сек*, что в пределах ошибок наблюдения можно считать совпадающим с непосредственно измеренными количествами энергии $6{,}5 \cdot 10^{-6}$.

Пойнтинг сделал и дальнейший шаг в исследовании сил светового давления, доказав существование сил давления при полном отражении именно тем, что он рассматривал силы давления, оказываемого светом при его преломлении на границе прозрачных сред. На коромысле крутильных весов помещались две призмы с углом преломления 34°, которые были закреплены так, что преломляющие ребра были вертикальны, а обращенные друг к другу поверхности были поставлены параллельно одна другой и перпендикулярно коромыслу; падающий пучок лучей шел наклонно на плоскость первой призмы, преломлялся, выходил из призмы перпендикулярно ее второй плоскости, шел в воздухе параллельно коромыслу весов, падал перпендикулярно на плоскость второй призмы, проходил через стекло и преломлялся на второй поверхности призмы так, что выходил параллельно своему первоначальному направлению. Силы, которые вызывает пучок лучей при своем двукратном преломлении на обеих границах, создают момент вращения коромысла; наблюдения дали момент вращения в $11 \cdot 10^{-6}$ *дин·см*, тогда как момент вращения, вычисленный по энергии пучка лучей, по коэффициенту преломления стекла и по углу падения лучей получался равным $6 \cdot 10^{-6}$ *дин·см*, — согласие, которое лежит в пределах ошибок наблюдения, всегда возможных при этих трудных опытах.

Еще раньше, чем существование сил светового давления Максвелла — Бартоли было с несомненностью доказано описанными прямыми методами, Луммер [6] и Прингсгейм [7] дали еще более точное количественное, хотя и не прямое доказательство этих сил на основании закона излучения Стефана — Больцмана; это доказательство было расширено путем измерений распределения энергии в спектре черного тела, на что указал недавно сам Луммер.

Экспериментальные исследования давления звуковых волн, произведенные Альтбергом [8], и водяных волн, недавно опубликованные Капцовым, указывают на то, что силы светового давления следует рассматривать как частный случай сил давления при волновых движениях различного рода.

Исследования светового давления не могут в настоящее время считаться законченными; еще не проведены исследования пондеромоторных сил, с которыми лучи действуют на газы, исследования, имеющие величайшее значение как для астрофизики, так и для молекулярной механики.

IV. ДАВЛЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ДВИЖУЩИЕСЯ ТЕЛА

Несколько раньше, чем Максвелл, Бартоли и Престон старались различным образом обосновать существование давления лучистой энергии; Стюарт [9] высказал предположение, что излучающее тело при своем движении будет испытывать противодействие от давления лучистой энергии, аналогичное трению и уменьшающее скорость движения тела. Недавно Тизен [10] дал доказательство этого сопротивления в наглядной форме, указал на его значение для астрофизики и вычислил величину годового замедления для времени обращения Земли вокруг Солнца. Пойнтинг исследовал ту же задачу весьма изящным и обстоятельным образом; Лармор также занимался движением излучающего тела.

В прекрасном исследовании Абрагам [11] разбирает влияние движения облучаемой, поглощающей или отражающей поверхности на величину сил Максвелла — Бартоли, действующих на эту поверхность.

Все эти исследования согласно показывают, что давление Максвелла — Бартоли возрастает, когда движение излучающей или облучаемой поверхности направлено обратно этому давлению и возрастание давления пропорционально отношению скорости движения тела (относительно покоящегося эфира) к скорости света; при движении в направлении давления последнее соответственно уменьшается. Для пучка параллельных лучей, падающего нормально к совершенно плоскому зеркалу, и при движении со скоростью v в направлении его нормали это давление будет

$$P = P_0 \frac{V + v}{V - v},$$

где P_0 — давление Максвелла—Бартоли на неподвижную поверхность,
V — скорость света.

Таким образом, перед экспериментальными исследованиями ставится задача необычайно широкого значения; эти предварительные теоретические работы дают нам верный и пока единственный метод для измерения абсолютной скорости Земли в эфире.

V. ПРИЛОЖЕНИЯ К АСТРОНОМИИ

Явления отталкивательной силы, с которой Солнце действует на кометные хвосты, привело Кеплера и Эйлера к предположению о давлении, зависящем от солнечного излучения. Когда эти силы давления были объяснены Максвеллом на основании электромагнитной теории, Фитцжеральд пошел обратным путем и количественно определил зависимость отталкивательной силы Солнца от размеров обращающихся вокруг него тел; простое вычисление показывает, что для больших тел эта отталкивательная сила незаметна, тогда как для пылинок, имеющих в диаметре тысячные доли миллиметра, ньютонианское притяжение со стороны солнечной массы уничтожается отталкиванием, вызываемым давлением солнечного излучения, а для тел еще меньших размеров отталкивание, зависящее от этого давления, будет превосходить притяжение масс. Аналогичные предположения делали Лодж [1], я, Аррениус [1] (для объяснения солнечной короны) и недавно Никольс и Гулль. Точное вычисление отталкивания, испытываемого малыми телами, размеры которых сравнимы с длинами волн падающей солнечной радиации, было проведено Шварцшильдом [1].

Выдающееся принципиальное значение для астрофизики имеют упомянутые выше исследования Тизена и Пойнтинга, указывающие на то, что излучающим телам приходится преодолевать сопротивление своему движению со стороны противодействующих сил излучения и что это движение будет непрерывно замедляться, следовательно. не сможет продолжаться неограниченно долгое время.

Поступило 26 июля 1905.

27. УСПЕХИ АКУСТИКИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТЬ ЛЕТ [1]

Из всех областей физики за последнее десятилетие акустика менее других привлекала к себе внимание исследователей, но все же число оригинальных работ, появившихся за это время, довольно велико; так, в Fortschritte der Physik от 1893 по 1903 г. реферировано 535 работ по физической акустике (не считая работ по физиологической акустике). Сделать обзор всех этих работ, проследить все разветвления, по которым идут исследователи, конечно, не представляется возможным, а потому мы ограничимся только теми исследованиями [2], которые за это время привели к более или менее законченным результатам. В нашем обзоре мы ограничимся физической акустикой, оставляя в стороне физиологическую акустику (восприятие звука ухом, механизм человеческого голоса и т. д.), а также усовершенствования в технических приборах (телефоне, фонографе, музыкальных инструментах). Для большего удобства мы можем разбить задачи физической акустики на следующие группы:

1) источники высоких звуков; 2) звуковая волна в воздухе; 3) движение звука в газах; 4) дисперсия звуковых волн; 5) собственные колебания упругих систем; 6) разные исследования по акустике.

Теперь обратимся к рассмотрению достигнутых результатов по группам.

1. *Источники высоких звуков и определение числа их колебаний.* В 1897 г. Штумпф [1] и Мейер [1] сделали интересное наблюдение, что метод субъективного определения высоты тех звуков, которые лежат у предела слышимости и выше его (15 000 колебаний в секунду), может вести к очень зна-

[1] Из лекций: «Современные задачи физики», читанных автором в Московском университете в 1903 г.

[2] В настоящем обзоре ссылки на источники опущены и указан лишь год опубликования работы; интересующиеся оригинальными работами легко могут найти необходимые указания в Fortschritte der Physik.

чительным погрешностям. Это наблюдение дало толчок как к устройству новых приборов для высоких звуков, так и к выработке методов определения числа их колебаний. Из всех способов (непосредственной записи, фотографирования, дрожания источника и т. д.) самым удобным и пригодным оказался известный метод «пыльных фигур» Кундта [2]. Р. Кениг [3] (1899) построил серию камертонов, из которых самый малый давал в трубке (в воздухе при 20°С) пыльные фигуры с расстоянием в 1,96 *мм* между узлами, что при скорости звука в 342,6 *м/сек* соответствует 90 000 полным или 180 000 простым колебаниям в секунду. Эдельман [4] (1900 г.) построил воздушный свисток (так называемый «свисток Гальтона») [5] в форме маленького паровозного свистка, у которого внутренний объем колпачка можно изменять поршнем, и нашел, что при достаточно малых объемах возможно еще получать пыльные фигуры с расстоянием в 2 *мм* между узлами, т. е. получать звуки, число полных колебаний которых 85 000, а число простых 170 000 в секунду. Как источник высоких звуков свисток Эдельмана заслуживает предпочтения перед камертонами Кенига, так как, давая звук приблизительно одинаковой силы с камертоном, он звучит непрерывно, и в нем легко в значительных пределах (например, от 170 000 до 15 000 простых колебаний) менять высоту звука [1].

Это новое усовершенствование источников звука позволяет нам воспользоваться воздушными волнами, длина которых меньше одного сантиметра, не только для более удобной демонстрации дифракции волн, но, что гораздо важнее, и для исследования свойств газов при таких быстрых колебаниях: если и для таких коротких волн воздух при атмосферном давлении еще представляет собою непрерывную среду, так как свободный путь его молекул менее одной десятитысячной доли этих волн, то все-таки вопрос об отличии скорости этих волн и их затухания в газах от соответствующих величин для редких колебаний остается открытым, и ответ на него может и должен дать только непосредственный опыт.

2. *Звуковая волна в воздухе*; ее форма, сила и давление. Приложение фотографии к записыванию звуковых колебаний дало возможность физиологу Герману [6] с замечательною отчетливостью регистрировать такие сложные формы волны, как те, которые соответствуют звукам человеческого голоса. Перепонка M (рис. 1) так называемого «вибрационного манометра», выгибаясь под влиянием волны в ту или другую сторону, двигает верхнюю часть очень маленького и легкого зеркальца S, нижний конец которого укреплен неподвижно на подставке A. Пучок света, идущий от горизонтальной щели FF через линзу L, отражается от зеркальца S и дает действительное изображение горизонтальной щели FF на вер-

[1] Таким образом, как трубы, так и камертоны позволяют нам получать все акустические колебания, начиная от тех, которые лежат на нижнем пределе слышимости, и кончая теми, которые лежат значительно дальше высшего предела слышимости; числа этих колебаний относятся как 1 : 6000 и обнимают собою 12 октав.

тикальном прорезе, сделанном в стенке цилиндра CC; внутри цилиндра CC вращается барабан, обтянутый светочувствительной пленкою. При дрожании перепонки M отраженный пучок света движется вверх и вниз и записывает свой след на пленке; пучок света чертит кривую линию, толщина которой меньше 0,1 *мм* при амплитуде в несколько миллиметров. Попытки применить для наблюдения прогибания перепонки как микроскоп, так и явления интерференции света (Webster [7], 1889), которые можно также регистрировать фотографическим путем, не дали большей чувствительности, чем указанный зеркальный способ, и вдобавок менее удобны, чем этот последний.

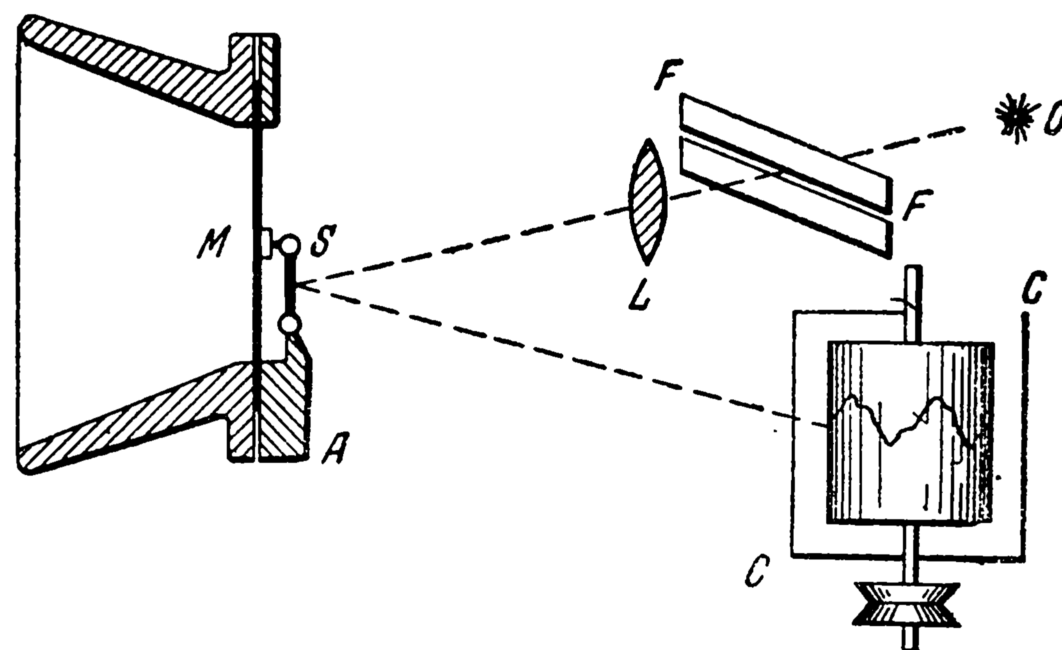


Рис. 1.

Рапс (1893) [8] предложил способ непосредственно наблюдать сжимание и разрежение воздуха вблизи отражающей стенки. Свет, идущий от электрического фонаря, падает на пластинку J_1 рефрактометра Жамена [9] (рис. 2), разделяется на два параллельных пучка, которые при помощи второй пластинки рефрактометра J_2 соединяются в ряд интерференционных полос, перпендикулярных щели цилиндра CC, внутри которого движется светочувствительная пленка. Интерферирующие пучки разделены друг от друга большою металлическою стенкою WW, на которую с одной стороны из рупора R падает исследуемая звуковая волна: вблизи этой неподвижной стенки, от которой звук отражается, образуются стоячие волны, и воздух тут то сгущается, то разрежается; всякое изменение плотности воздуха сказывается в изменении показателя преломления его, т. е. в скорости движения в нем световой волны, благодаря чему интерференционные полосы в рефрактометре перемещаются перпендикулярно своему направлению, т. е. параллельно щели цилиндра CC и отмечают свое смещение в виде ряда параллельных кривых на движущейся светочувствительной пленке.

Метод Германа имеет то преимущество перед методом Рапса, что он гораздо более чувствителен (дает большие амплитуды кривых), а самые кривые вычерчены тонким световым пучком и позволяют наблюдать все детали, тогда как в способе Рапса кривые чертятся нерезко ограниченными интерференционными полосами. Необходимым требованием в способе Германа является условие, чтобы собственный тон мембраны лежал значительно выше тона исследуемой волны, так как только в этом случае прогиб мембраны будет в каждый момент соответствовать давлению волны,

и этому требованию оказывается легко удовлетворить на практике для самых высоких регистров человеческого голоса. Для звуков еще более высоких способ Германа неприложим — для них придется пользоваться способом Рапса, который принципиально пригоден для звуков любой высоты; пользуясь им, мы легко можем определить в абсолютной мере амплитуду колебаний даже неслышной ухом волны, если знаем оптический показатель преломления воздуха, длину пучка света, на которую действует звуковая волна, и величину смещения интерференционных полос.

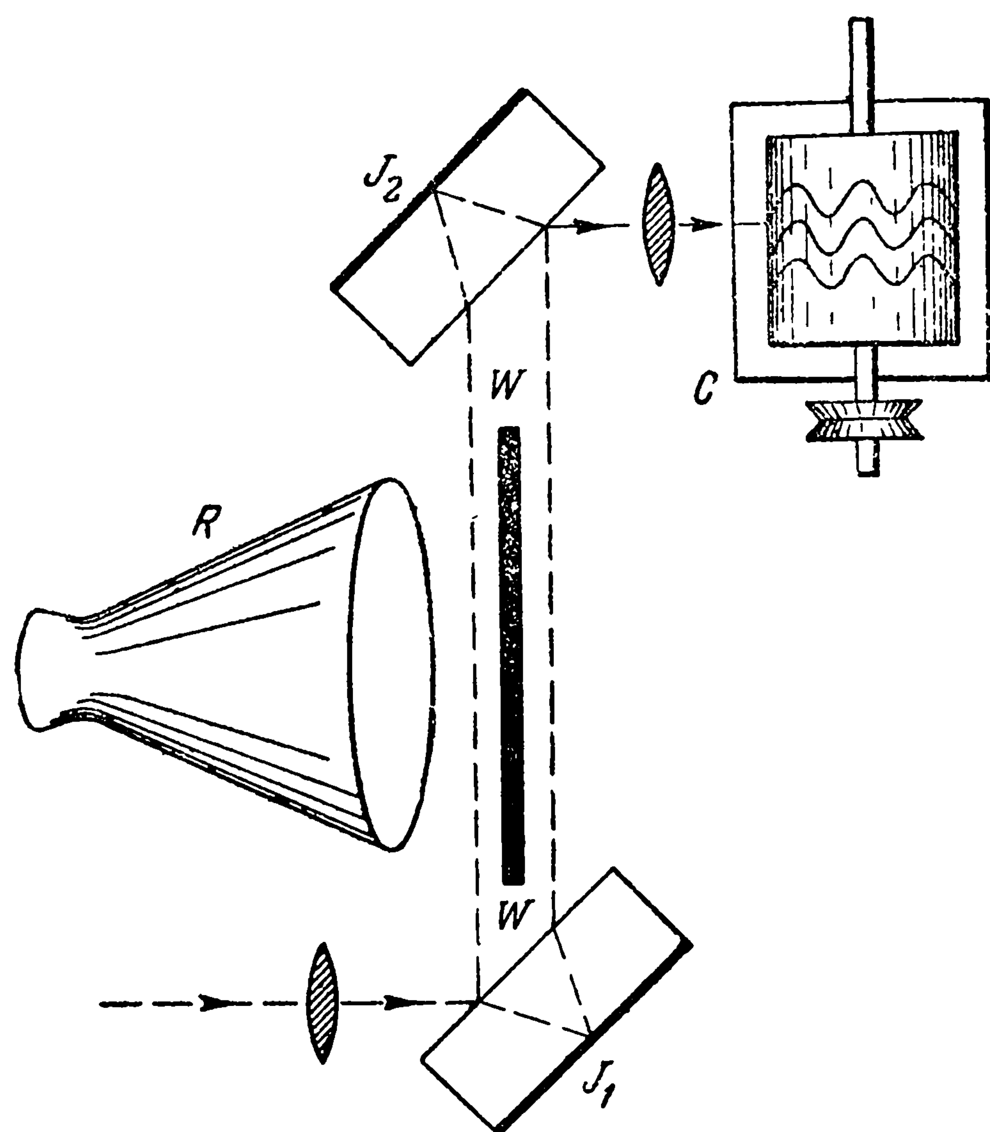


Рис. 2.

В вопросе об абсолютном измерении силы звука за истекшее десятилетие был сделан существенный шаг вперед. Лорд Рэлей (1902) показал теоретически [10], а В. Я. Альтберг [2] (1903) убедился непосредственным опытом, что звуковые волны, падая на отражающую их стенку, производят на эту последнюю звуковое давление, которое совершенно аналогично световому давлению и также зависит от количества энергии E, падающей в течение 1 *сек* на 1 *см*^{2} отражающей поверхности, и от скорости распространения V этих волн в окружающей среде:

$$p = \frac{2E}{v}.$$

Это давление p не зависит от формы волны. Альтберг располагал свой опыт таким образом: волны от конца кундтовой трубки, непрерывно возбуждаемой двигателем, падали на отражающую стенку, размеры которой были велики по сравнению с длиной падающей на нее волны. В середине стенки было сделано круглое отверстие, в которое свободно, не касаясь краев, но с очень небольшим кольцевым зазором входил поршень, прикрепленный к коромыслу крутильных весов. Как только на стенку начинал падать звук, волны начинали давить на стенку и на поршень, отчего этот последний двигался в направлении падающего на него звука, закручивая проволоку крутильных весов. Измеряя угол закручивания, легко было определить величину звукового давления, а отсюда и количество

падающей в секунду энергии; оказалось, что при непрерывном звучании кундтовой трубки, дающей звук, по силе нестерпимый для человеческого уха, все количество энергии, излучаемой концом трубки в форме звуковых волн, не более 0,02 л. с., а звуковое давление, производимое на стенку, находящуюся на 50 *см* от конца трубки, едва достигает 0,0002 *мм рт. ст.*, т. е. меньше 0,2 миллионных долей атмосферы.

Определение абсолютной силы звука при помощи звукового давления применимо только для очень сильных звуков, так как случайные разницы давлений по обе стороны отражающей стенки, обусловленные неизбежными токами воздуха в комнате, легко достигают тех величин, которые имеет звуковое давление при слабых звуках. Этот метод звукового давления, теория которого вполне выработана, сам не обладая большой чувствительностью, может, однако, послужить с пользою для проверки абсолютных показаний «диска Рэлея» [1], теория которого была дана Кенигом (1891) лишь в первом приближении, а попытка экспериментально проверить ее была сделана Двельшауверс-Дери [11] (1891) только для действия стационарного (не колеблющегося) воздушного потока; вот почему диском Рэлея — прибором, удобным для измерений, — до настоящего времени пользовались только для определения относительной силы звука.

Как попытку обнаружить движение воздуха в пучности стоячей волны следует отметить прием Дэвиса [12] (1900), который воспользовался очень маленьким анемометром, построенным по образцу анемометра Робинсона [13], употребляемого метеорологами для измерения скорости ветра; в какой мере соответствуют показания анемометра Дэвиса истинной средней скорости колебаний воздушных частиц, остается невыясненным, и во всяком случае этот способ не так чувствителен и не так удобен, как диск Рэлея.

Помимо давления на отражающие стенки, звуковые волны производят также механические действия на соответствующие им резонаторы, вращая и двигая их; эти явления были исследованы мною (1897), и законы действия звуковых волн на резонаторы оказались, как и в случае звукового давления, тождественными с соответствующими законами действия электромагнитных волн на электрические резонаторы. Эта анология указывает на глубокую связь, которая существует между колебаниями, столь различными по их физической природе.

3. *Движение звука в воздухе и в газах*; *скорость звука и его распространение*. При точном определении абсолютной величины скорости звука приходится считаться с целым рядом затруднений. Желая измерить эту скорость с точностью до $\pm$ 0,1 *м/сек*, мы должны определить температу-

---

[1] В 1876 году Рэлей показал, что диск, могущий вращаться около своего диаметра и поставленный так, что его плоскость составляет некоторый угол с плоскостью звуковой волны, идущей мимо него, испытывает вращение и стремится стать параллельно плоскости волны.

ру воздуха на всем пробеге волны с точностью до $\pm 0{,}1$°C и влажность его — до ± 1 *мм*, что совершенно невозможно в свободном воздухе и очень трудно в длинной трубе: в этих двух случаях обыкновенно пользуются по способу Реньо [14] звуком пистолета, который представляет собой сложную смесь колебаний разных периодов: при движении волны в воздухе колебания с малыми периодами больше слабеют, чем колебания с большими периодами, а поэтому при больших пробегах не только амплитуда, но и самая форма взрывной волны изменяется, чем и затрудняется определение момента прохождения ее гребня. В способе Квинке и Кундта определяют период источника звука, что возможно сделать с точностью до одной десятитысячной доли, и измеряют длину соответствующей стоячей волны в короткой трубке; определить температуру и влажность воздуха в этом случае не представляет затруднения, но является необходимость ввести поправку на диаметр трубы для приведения измеренной скорости звука к скорости его в свободном воздухе — поправку, указанную впервые Кирхгофом и многократно проверенную на опытах с трубками разных диаметров. Следует заметить еще, что скорость звука зависит от амплитуды волны (Бюртон [15], 1893; Виель [16], 1898—1899) и в случае взрывных волн вблизи источника, где амплитуда очень велика, эта скорость распространения волны может быть втрое больше нормальной скорости распространения звука; те амплитуды, которыми обыкновенно пользуются при опытах над скоростью звука, настолько малы, что они не сказываются заметным образом на величине этой скорости.

Определения, сделанные за истекшее десятилетие разными наблюдателями, дали для скорости звука в сухом воздухе при 0°C следующие величины:

	м/сек
Low (1894) [15]	331,4 (способ Квинке)
Tezexys (1895) [17]	333,2 (в свободном воздухе)
Violle [18] et Vautier (1900)	331,1 (способ Реньо)
Те же (поправка Brillouin'а [19]	331,3 (способ Реньо)
Stevens (1902) [20]	331,3 (способ Квинке)

Собирая данные, полученные разными наблюдателями, мы приходим к заключению, что в воздухе при 0°C звуки средних регистров распространяются со скоростью

$$v = 331{,}3 \pm 0{,}1 \ \textit{м/сек}.$$

Открытым остается до настоящего времени вопрос о влиянии периода колебания на скорость распространения его в воздухе, — вопрос, который ни в работах Эньяна [15] и Шабо [15] (1895), ни в работе Мюллера [15] (1903) не получил решения; это решение мы должны ожидать от измерения скорости возможно более коротких звуковых волн, для определения которой Нардорф [15] (1900) указал изящный метод, аналогичный методу Физо для света; очень короткие волны от свистка Гальтона про-

ходят между двумя зубцами колеса, падают на вогнутое зеркало с большим радиусом кривизны, и, отразившись, собираются вновь, проходя между зубцами того же колеса, и падают на чувствительное пламя; если мы начнем двигать колесо достаточно быстро, то звук, пробегающий от свистка к пламени, встретит около последнего не промежуток между зубцами, а самый зубец, который защитит пламя от звука и позволит ему гореть спокойно, тогда как при еще большей скорости звук попадает снова между зубцами и будет действовать на пламя и т. д.; наблюдая скорости колеса, при которых пламя горит спокойно, и зная расстояние между зубчатым колесом и зеркалом, легко вычислить скорость звука. Нардорф рекомендует описанный способ лишь как демонстрацию принципа Физо; до настоящего времени никаких определений скорости звука этим способом сделано не было [21].

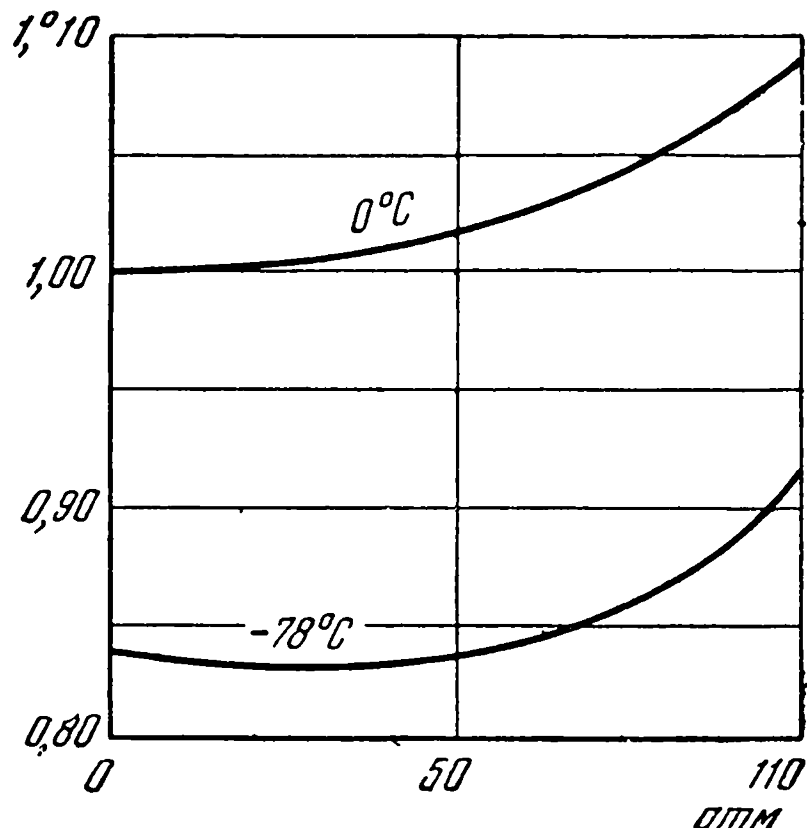


Рис. 3.

Пользуясь методом Кундта, Витковский [22] (1899) показал, что если скорость при 0° и 1 *атм* обозначить через единицу, то получаются следующие результаты (рис. 3):

p, *атм*	0°	—78°
1	1,000	0,844
50	1,021	0,837
110	1,077	0,913

Эта работа Витковского указывает на то, что та элементарная теория газов, по которой скорость звука не должна зависеть от давления газа, недостаточна для больших давлений.

Стивенс (1902) по способу Квинке определил скорости звука в воздухе при разных температурах, а также измерил скорости звука в парах некоторых жидкостей. Ниже в таблице приведены температуры, скорости звука и вычисленные отношения *k* удельной теплоты газа при постоянном давлении к удельной теплоте его при постоянном объеме.

Воздух	0° C	331,3	1,401	Этиловый спирт	100	272,8	1,134
Воздух	100	386,5	1,399	Сероуглерод . . .	100	223,2	1,234
Воздух	950	686,0	1,340	Бензол	100	205,0	1,105
Этиловый эфир .	100	212,6	1,112	Хлороформ . . .	100	171,4	1,150
Метиловый спирт	100	350,3	1,256	Иод	185	140,0	1,303

Эта работа дает для термодинамики газов очень важный результат, показывая, что отношение k для воздуха не есть величина постоянная, как то принималось до настоящего времени.

К числу задач, для решения которых современные средства измерения еще не достаточны, принадлежит и задача о законе обратных квадратов расстояний. Наблюдения Дэффа [23] (1898—1900) заставляют предполагать, что высокие тоны поглощаются в воздухе более, чем низкие, согласно с наблюдениями Биоля и Вотье (1895). Во всяком случае, коэффициент этого поглощения для звуков среднего регистра очень мал, и звук пробегает сотни метров без заметного поглощения; надо ожидать, что наблюдения с возможно короткими волнами дадут более резкие отступления от закона квадратов расстояний.

Перед современной акустикой открывается широкое поле приложения методов, которыми пользуются для акустического исследования воздуха, к исследованию других газов и паров: здесь намечается путь, по которому мы можем ближе подойти к решению некоторых вопросов кинетической теории газов.

4. *Дисперсия звуковых волн.* Уже давно пользуются явлениями интерференции и дифракции звука как средством для наглядной иллюстрации соответствующих световых явлений; общие кинематические свойства волнообразных колебаний позволяют установить здесь полную аналогию. За истекшее десятилетие к этой кинематической аналогии была присоединена и механическая: давление звука на отражающие стенки (Рэлей, Альтберг, см. выше), аналогичное давлению света на зеркальные поверхности. Еще более крупный шаг в этом направлении был сделан Н. П. Кастериным [24] (1898, 1901, 1904), которому удалось проследить аналогию в явлениях дисперсии акустических и световых волн.

Согласно современному учению о свете мы представляем себе, что, проходя внутри тела, световая волна движется в свободном эфире [1] между частицами (молекулами) тела, и предполагаем, что дисперсия [2] волн зависит от периодов тех собственных колебаний, которые свойственны молекулам данного тела, и характеризуется полосами поглощения в спектре этого тела. Согласно с опытом оптические теории приводят к явлению «нормальной» дисперсии между полосами поглощения и дисперсии «аномальной» внутри самих полос поглощения, причем скорость света в дан-

---

[1] В свободном эфире скорость световой волны не зависит от периода ее колебаний, совершенно так же, как в пределах ошибок наблюдений скорость звука в воздухе не зависит от числа колебаний источника.

[2] Дисперсией мы называем зависимость показателя преломления от периода колебания (т. е. от длины волны); если показатель преломления увеличивается с уменьшением длины волны, то дисперсия называется нормальной, в противном случае — аномальной.

ной среде может быть как больше, так и меньше скорости света в чистом эфире. Н. П. Кастерин осуществил для звука условия, аналогичные тем, при которых световая волна движется между частицами тела (рис. 4): звуковая волна, идущая от конца кундтовского стержня, движется в трубе (с квадратным сечением), по оси которой на тонких подставках укреплены на разных расстояниях равновеликие твердые (стеклянные) шары: между каждой парой шаров и стенками трубки помещается воздушный объем, обладающий определенным периодом собственного колебания. Пользуясь звучащими стержнями разных размеров и измеряя расстояние между узлами стоячей волны (способом пыльных фигур Кундта)

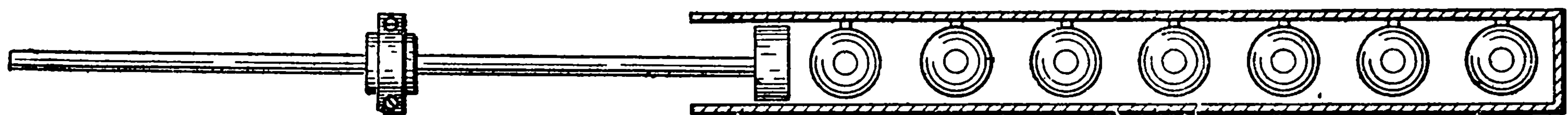


Рис. 4.

в том случае, когда в трубе был только воздух $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$, и тогда, когда в трубе находятся шары $\left(\frac{\lambda'}{2}\right)$ Н. П. Кастерин получил следующий ход показателя преломления $n = \frac{\lambda}{\lambda'}$ для пространства, заполненного шарами.

Таблица 1

$\frac{\lambda}{2}$, *мм*	$\frac{\lambda'}{2}$, *мм*	$n_{\text{набл}}$	$n_{\text{выч.}}$	$\frac{\lambda}{2}$, *мм*	$\frac{\lambda'}{2}$, *мм*	$n_{\text{набл.}}$	$n_{\text{выч.}}$
175	165	1,06	1,06	61	57	1,07	1,01
82	72	1,13	1,14	50	57	0,88	0,83
76	60	1,27	1,27	43	43	1,00	0,99
68	58	1,17	1,14	38	37	1,03	1,03

Н. П. Кастерину удалось также дать полную теорию движения волны в воздушной среде, заполненной твердыми шарами; показатель преломления, вычисленный на основании этой теории (n выч.), как видно из табл. 1, в пределах возможных ошибок отсчетов совпадает с наблюденными величинами.

В форме, еще более подходящей к случаю оптической дисперсии, Н. П. Кастерин провел наблюдения, поместив в трубе Кундта не твердые шары, а полые цилиндрические резонаторы. Результаты наблюдений приведены в табл. 2

Таблица 2

$\frac{\lambda}{2}$, *мм*	$\frac{\lambda'}{2}$, *мм*	$n_{\text{набл.}}$	$n_{\text{выч.}}$	$\frac{\lambda}{2}$, *мм*	$\frac{\lambda'}{2}$, *мм*	$n_{\text{набл.}}$	$n_{\text{выч.}}$
103	98	1,05	1,07	71	80	0,90	0,89
98	90	1,09	1,10	68	69	0,98	0,94
91	78	1,17	1,13	55	55	1,00	—
76	80	0,95	1,95	44	43	1,01	—

Мы видим, что по мере приближения к области резонанса показатель с уменьшением длины волны постепенно растет (нормальная дисперсия); внутри области резонанса $\left(\text{около } \frac{\lambda}{2}=82 \text{ } мм\right)$, где поглощение звуковых волн очень сильно затрудняет наблюдения, этот показатель быстро падает вместе с длиной волны (дисперсия аномальная), а потом, по ту сторону области поглощения, снова растет с уменьшением длины волны (дисперсия нормальная).

Аналогичные явления в оптике нам известны из работы Пфлюгера [25] (Pflüger, Wied. Ann., 56, 1895), который измерял показатель преломления света в призме из твердого фуксина для разных длин волн видимого спектра, включая в свои наблюдения и полосу поглощения фуксина (около $500 \cdot 10^{-6}$ *мм*). Результаты этих наблюдений приведены в табл. 3.

Таблица 3

λ (в возд.), 10^{-6} *мм*	$n_{\text{набл.}}$	λ (в возд.), 10^{-6} *мм*	$n_{\text{набл.}}$
703	2,30	461	0,83
671	2,34	434	1,04
589	2,64	410	1,17
535	1,95	405	1,35
486	1,05		

Ход оптического показателя преломления в твердом фуксине совершенно такой же, как и звукового показателя в воздухе, наполненном акустическими резонаторами: как там, так и здесь аномальная дисперсия наблюдается в области полосы поглощения и как там, так и здесь показатель преломления делается меньше единицы, т. е. скорость волны в среде благодаря присутствию поглощающих (резонирующих) центров делается больше, нежели скорость ее в свободном эфире или в свободном воздухе. Аналогия между явлениями акустическим и оптическим полная.

Ламб [26] (Lamb, 1897) и Годфри [15] (Godfrey, 1898) теоретически исследовали вопрос о скорости распространения упругой волны вдоль бесконечно длинного стержня, на всем протяжении которого на равных расстояниях укреплены добавочные массы; скорость продольной волны в таком стержне, обладающем периодической структурой, также оказывается зависящей от длины волны, и мы в этом случае также можем говорить о дисперсии упругих колебаний в твердом теле.

5. *Собственные колебания упругих систем.* Исследования колебаний пластинок, струн, органных труб, рупоров и резонаторов дали за истекшее десятилетие ряд интересных работ, которые мы рассмотрим по отделам.

a. Пластинки, свободно колеблющиеся под влиянием своих внутренних упругих сил, не обещая дать никаких существенно новых результатов, до настоящего времени продолжают привлекать к себе внимание. как интересные задачи аналитической механики; в истекшее десятилетие ими занимались теоретически и экспериментально Пикар [27] (Picard, 1895) и Рицци (Rizzi, 1897), а в особенности Ценнек [28] (Zenneck, 1898) и Цейсиг [29] (Zeisig, 1898). Пользуясь фотографией, Кемпф-Гартман [2] (Kempf-Hartmann, 1902) обстоятельно изучил колебания плоских стальных пружин и указал, что при больших амплитудах период колебаний сильно изменяется (уменьшается).

b. Струны были исследованы при помощи фотографии Кригар-Менцелем [30] и Рапсом (Krigar-Menzel und Raps, 1901—1903): при помощи линзы они проектировали известную часть ярко освещенной струны на щель, сзади которой равномерно быстро двигалась фотографическая пластинка; приводя струну в дрожание при помощи удара или смычка, исследователи заставили изображение данной точки струны записывать свой след на двигающейся фотографической пластинке.

Кривые движения, полученные для разных точек струны при разных условиях ее возбуждения, представляют собою на первый взгляд маловероятные формы движения, но механическая теория движения струны, данная исследователями, вполне разъясняет наблюденные характерные скачки в скоростях движения отдельных точек струны, и мы можем сказать, что в настоящее время задача о движении струны как экспериментально, так и теоретически выяснена всесторонне; в этом исследовании принимали также участие Корню [31] (Corny, 1895) и Лерд [15] (Laird, 1898).

c. Органные трубы привлекали к себе внимание в особенности за последние три года: в ряде работ Гензен [32] (Hensen, 1900—1901), Фридрих (Friedrich, 1902) и Верт (Werth, 1903) стараются выяснить те явления, которые имеют место при возбуждении звука трубы; в этом направлении следует особенно отметить работу Ваксмута (Wachmuth [33], 1903), которому удалось фотографически проследить движение воздуха вблизи губы трубы: ряд снимков, сделанных на пленке кинематографа при вспыш-

ках света электрических искр [1], показывает, что воздух, вырываясь из щели, представляет собою как бы упругую воздушную пластинку, которая, устремляясь мимо губы, начинает между щелью и губою постепенно выгибаться в противоположную сторону, наконец, перескакивает на другой бок губы и тогда выгибается обратно, чтобы в известный момент снова перескочить в прежнее положение, и т. д. Период этого колебания зависит от скорости движения воздушной струи (от давления в мехах), от расстояния губы от щели и от собственного тока воздушной колонны в трубе: чем больше скорость воздушной струи, тем больше ее упругость и, следовательно, тем выше и ее тон; при очень больших давлениях в мехах труба перестает давать свой основной тон и может давать только один из обертонов.

d. Рупоры, т. е. конические разговорные и слуховые трубы разных форм, играющие такую важную роль при записях и воспроизведениях в граммофонах и фонографах, были старательно изучаемы в целом ряде работ Нейренефа (Neureneuf [15], 1895, 1898, 1899) и Маража (Marage, [34], 1897); наблюдатели ограничились сообщением обширных таблиц определений серий собственных тонов разных рупоров и указали некоторые эмпирические соотношения.

e. Резонаторы были исследованы очень обстоятельно начиная с классических работ Зондгауза [35] и Гельмгольтца [2], но лишь по отношению к тонам их собственного колебания. Важный вопрос о декрементах затухания этих колебаний, которыми определяется сила отзывчивости резонатора в области его резонанса,— этот вопрос был впервые поставлен и решен в работе П. Б. Лейберга [2] (1896): неизменный по высоте и силе звук, идущий от непрерывно звучащего элекромагнитного камертона, падал на резонатор; к слуховой трубке резонатора был прикреплен вибрационный манометр М. Вина [2], которым и измерялось возбуждение (отклик) резонатора на звук данной высоты. Резонаторы были раздвижные, что позволяло, не изменяя отверстия резонатора и его расстояния от камертона, изменять высоту его собственного тона; раздвигая резонатор, легко было убедиться, что возбуждение его постепенно растет, приближаясь к полному резонансу с источником звука, а потом падает; на рис. 5 нанесены по ординатам возбуждения резонатора, измеренные вибрационным манометром, а по абсциссе высота собственного тона резонатора, определенная обычным способом (легким вдуванием воздуха), по сравнению с серией нормальных камертонов: отмечая тот интервал, на который надо расстроить резонатор, чтобы возбуждение его упало на половину его возбуждения при полном резонансе с источником, легко вычислить величину декремента затухания. Как Лейберг, так и

[1] Продолжительность свечения электрической искры от лейденской банки измеряется миллионными долями одной секунды, так быстро не могут работать механические затворы кинематографов.

Покеттино (Pochettino [36], 1899), работавший по методу Лейберга, определили декремент затуханий для разных типов резонаторов.

6. *Исследования по основным вопросам акустических колебаний.* Говоря об исследованиях по акустике за истекшее десятилетие, нельзя не отметить выхода вторым изданием капитального труда; Lord Rayleigh, «Theory of Sound»; можно также указать на появление популярной работы: Van Schaik [37] (1902) «Wellenlehre und Schall». По математической обработке основных вопросов волнообразного движения в Англии появились работы лорда Кельвина (Lord Kelvin, 1898, 1899), лорда Рэлея (Lord Rayleigh, 1901) и Ламба (Lamb, 1901).

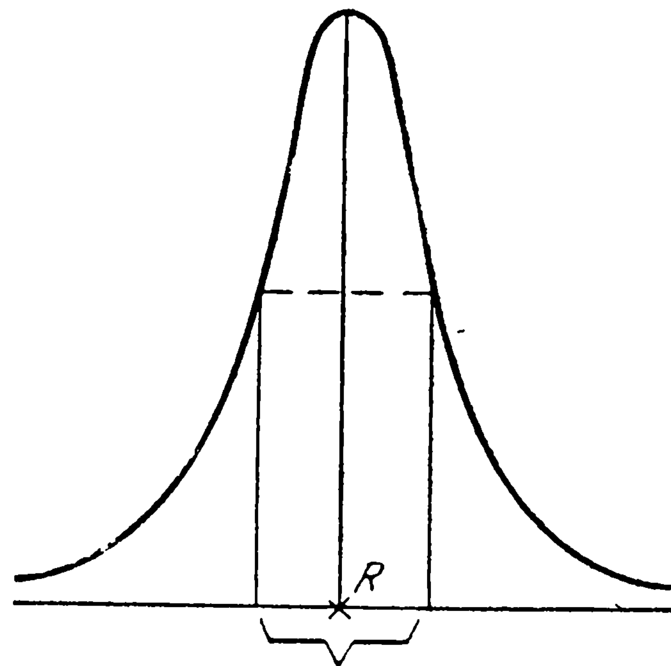


Рис. 5.

Особое внимание было обращено на исследование колебаний сопряженных резонирующих систем М. Вином (M. Wien, 1896, 1897) и лордом Рэлеем (Lord Rayleigh, 1902) ввиду того, что задача эта не только представляет собою большой интерес для акустики, но особенно потому, что она охватывает собой ряд явлений, с которыми приходится сталкиваться при пользовании электрическими колебаниями для беспроволочного телеграфа.

Подводя итоги нашему обзору успехов акустики за истекшее десятилетие, мы должны сказать, что перед нами открыты многочисленные пути уже назревших исследований. Помимо основных задач, которые выдвигает кинетическая теория газов, наша ежедневная практическая жизнь постоянно заставляет нас чувствовать недостаток простого и чувствительного объективного приема для определения силы и характера звуковых колебаний, который мог бы, наконец, заменить нам наши неопределенные субъективные оценки определенным количественным измерением.

Москва. Март 1905.

28. ОБ ИЗМЕРЕНИИ СПОКОЙСТВИЯ И ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ

В дополнение предложений, сделанных мною по указанному вопросу (Приложение XI к протоколу 22—24 апреля 1905 г.), я предполагаю, что для практического решения вопроса необходимо участие в его разрешении астрономов, наблюдающих в разных обсерваториях, и для возможно быстрого успеха дела было бы полезно, если бы председатель нашей комиссии обратился непосредственно к отдельным наблюдателям как русским, так и иностранным с опросным листом приблизительно следующего содержания.

Русское отделение Международной комиссии по исследованию Солнца, желая выяснить, в какой мере и какими инструментами возможно и удобно количественно измерять спокойствие и прозрачность атмосферы во время солнечных наблюдений, предлагает для этой цели измерять (в секундах дуги) дрожание нижнего края Солнца и фотографировать (в красных лучах) яркость неба вблизи Солнца по сравнению с яркостью нормально освещенной Солнцем матовой белой поверхности. Задача предлагаемого исследования — выработать методы и инструменты для соответствующих измерений.

Программа наблюдений: дрожание края Солнца и фотометрия неба вблизи него при разных высотах Солнца.

Русское отделение Комиссии обращается к Вам с следующими вопросами:

1) желаете ли Вы принять участие в этой работе?

2) какими методами и приборами Вы предполагаете пользоваться?

3) имеете ли сделать предложения для сообщения другим заинтересованным лицам?

4) имеете ли сделать иные замечания?

Перед весенним заседанием Отделения Комиссия может разослать запросы лицам, изъявившим согласие работать по означенным вопросам, для выяснения полученных результатов.

29. ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СПЕКТРА β AURIGAE [1]

*(Изв. Имп. АН, **24**, стр. 93—95, 1906)*

Исследуя спектр β Aurigae, А. А. Белопольский [2] [1] нашел, что эпоха совпадения линий в фиолетовой части спектра на 0,013 дня запаздывает относительно эпохи совпадения линий в синей части его и, сделав предположение, что длины волн одинаковых линий, даваемые каждым солнцем системы β Aurigae, тождественны, объяснил найденное явление разностью скоростей (дисперсией) синего и фиолетового света в мировом пространстве. Ввиду того что допущение заметной дисперсии в мировом пространстве приводит к противоречию со всеми современными оптическими теориями, в которых дисперсия неразрывно связана с поглощением света [3], я позволю себе предложить другое объяснение указанных особенностей в спектрограммах β Aurigae.

Как А. А. Белопольский, так и H. C. Vogel [2] [4] указывают, что характер компонент двойных линий в спектре β Aurigae временами заметно различен и меняется с течением времени — особенность, которая свидетельствует о том, что слои газов, обусловливающих наблюдения линии поглощения, находятся при разных физических условиях. β Aurigae представляет собою по Vogel'у систему из двух солнц, весьма близких друг к другу, и наблюдатель в эпохи, близкие в периастрию, сравнивает спектры внутренних частей системы A или B с соответствующими наружными частями ее b или a, т. е. сравнивает поглощающие слои, находящиеся при разных давлениях и при разных температурах. Как известно из лабораторных опытов [5], увеличение давления излучающего

---

[1] Доложено в заседании Физ.-матем. отделения 7 декабря 1905 г.
[2] А. А. Белопольский. Изв. АН, 21, стр. 153, 1904.
[3] См. М. Plank. Ber. d. Berl. Akad., p. 740, 1904.
[4] H. C. Vogel. Ber. d. Berl. Akad., p. 514, 1904.
[5] H. Kayser. Handbuch der Spektroscopie, 2, p. 322, Leipzig, 1902.

(а следовательно, и поглощающего) газа сопровождается не только изменением вида (характера) спектральных линий, но и изменениями длин волн этих линий, причем линии одного и того же элемента, принадлежащие к разным спектральным сериям, смещаются различно. Hympreys [3] [1] нашел, что вольтова дуга, в которой испаряется Ca или Na дает изменение длин волн спектральных линий, если давление окружающего воздуха, в котором она горит, повысить на 10 *атм*. Если мы две вольтовы дуги Hympreys'а, одну при 1, а другую при 11 *атм*, из лаборатории перенесем на место двух солнц β Aurigae,то мы станем наблюдать запаздывание эпох совпадений линий относительно эпохи истинного перехода вольтовых дуг через линию зрения согласно таблице.

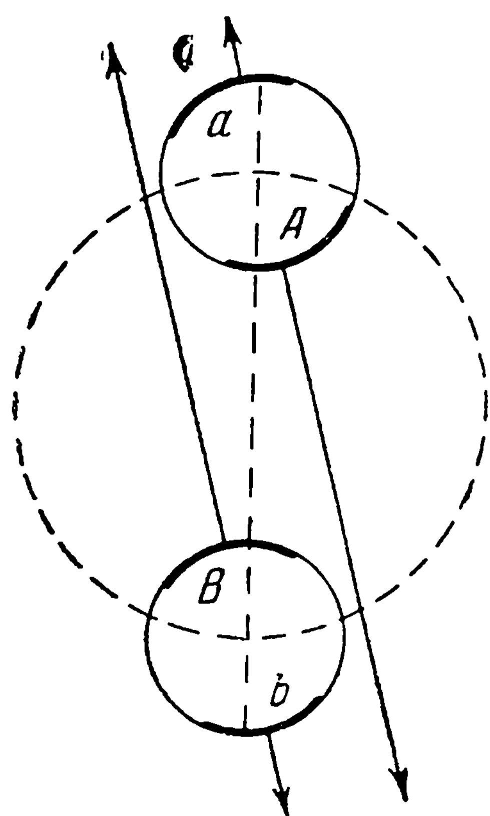


Рис. 1.

То, что из таблицы следует для линий испускания, должно иметь место и для линий поглощения; при разницах давления, не превосходящих 10 *атм*, разницах, ничтожных по сравнению с возможными разницами давлений на поверхностях двойной звезды, время запаздывания эпох совпадения разных линий того же порядка, как и найденная А. А. Белопольским величина в 0,013 дня, с той разницей, что это время не связано с положением линии в спектре.

Предложенное объяснение сводится к следующему: в моменты максимального расхождения компоненты двойных линий спектра β Aurigae обусловлены поглощениями газов, находящихся при одинаковых условиях, а в эпохи совпадений компонент одна из них соответствует газу, находящемуся при большом давлении, и, следовательно, более смещена

Таблица

λ, Å	Δλ, по Hympreys'у, Å	Запаздывание, дни
Ca 4226,91	0,048	0,010
Ca 4318,80	0,027	0,005
Ca 4454,97	0,073	0,014
Na 5688,42	0,323	0,048
Na 5890,18	0,062	0,009

[1] W. J. Hympreys. Astrophys. Journ., 6, p. 169, 1897.

к красному концу спектра, чем другая компонента. Проверить такое предположение можно следующими измерениями: середина компонент (полусумма длин волн) должна перемещаться относительно неподвижной (поправленной на движение Земли) земной линии, передвигаясь к фиолетовому концу для эпох максимального расхождения и к красному для эпох совпадений; амплитуда этого колебания должна быть различна для различных линий, но не должна превосходить несколько сотых долей единицы Ангстрема. Эпохи максимального расхождения компонент должны совпадать для всех линий, эпохи совпадения компонент должны быть различны для различных линий, независимо от положения их в спектре.

Москва. 28 октября 1905.

30. КАЖУЩАЯСЯ ДИСПЕРСИЯ СВЕТА В МЕЖЗВЕЗДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Чтобы объяснить интересное открытие г. Ш. Нордмана [1] [1], подтвержденное г. Г. Тиховым [2] [2], что эпоха минимума переменной звезды, наблюдаемой в красных лучах спектра, упреждает на несколько минут минимум, наблюдаемый в фиолетовых лучах, оба эти ученые предполагают, что в межзвездном пространстве свет испытывает дисперсию, сравнимую с дисперсией в атмосферном воздухе при 107 *мм* давления и 0° С.

Хотя это объяснение и весьма просто, однако оно имеет тот большой недостаток, что стоит в противоречии с положениями современной науки: мы не можем приписать эту дисперсию какому-либо обыкновенному газообразному веществу, в котором дисперсия тесно связана с поглощением. Действительно, теория света [3] требует в этом случае такого большого поглощения, что мы не могли бы видеть ни звезд, ни даже нашего Солнца; мы не можем также приписать эту роль самому эфиру, не опрокинув всех наших электромагнитных теорий.

Открытие г. Нордмана можно объяснить, не прибегая к дисперсии света в межзвездном пространстве, если мы будем искать причины разности между эпохами в физических свойствах переменной звезды. Астрофизические наблюдения показывают, что изменения блеска зависят от прохождения перед наблюдаемой звездой спутника, и различие в уменьшении света в различных частях спектра [4] указывает на то, что спутник окружен значительной газообразной атмосферой, поглощающей свет центральной звезды. Достаточно поэтому сделать предположение, что

---

[1] Comptes rendus, **146**, p. 266 и 383.

[2] Comptes rendus, **146**, p. 570; Изв. Николаевской обсерватории в Пулкове, № 11, 1908.

[3] См. Планк. Ber. der Berliner Akad., p. 740, 1904.

[4] См. Шварцшильд [3]. Publik. der Koffner'schen Sternwarte, **5**, 1900, и Тихов, l. c. p. 165.

атмосфера спутника распределена не вполне симметрично относительно его центра и что она смещена в направлении его орбиты, — асимметрия, которая может быть результатом вращения вокруг оси и нагревания излучением центральной звезды, — и разность эпох минимума для красного и для фиолетового света вытечет отсюда сама собою.

Подобный случай осуществлялся бы в нашей планетной системе для наблюдателя, находящегося во время затмения на поверхности Луны: эпохи минимума, наблюдаемые для $\lambda = 6,5\,\mu$ (полоса поглощения водяного пара в инфракрасных лучах) и для $\lambda = 0,5\,\mu$ (прозрачность), были бы различны, ибо влажность земной атмосферы больше с темной стороны, чем со светлой. Для света, поглощаемого водяным паром на нашей Земле, эта разность эпох не превысила бы для Луны нескольких долей секунды; но в обширной атмосфере спутника, вращающегося в непосредственном соседстве от центральной звезды, возмущения значительно больше, и два луча света, неодинаково поглощаемые этой атмосферой, могут дать минимумы, эпохи которых разойдутся до нескольких минут.

Открытие г. Нордмана не может поэтому служить для исследований дисперсии света в межзвездном пространстве, даже если бы эта дисперсия имела огромную величину, допускаемую г. Нордманом, ибо его метод основан на предположении, что атмосферы спутников двойных звезд строго симметричны, — гипотеза, которая не может быть проверена самостоятельным образом.

31. НЕВОЗМОЖНОСТЬ ДОКАЗАТЬ СУЩЕСТВОВАНИЕ ИЗМЕРИМОЙ ДИСПЕРСИИ СВЕТА В МЕЖЗВЕЗДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПО МЕТОДУ НОРДМАНА — ТИХОВА

В недавно опубликованной заметке (Comptes rendus, **147**, 20 июля 1908, p. 170), г. Г. А. Тихов [1] дает расстояние *RT* Персея, которого мне недоставало, чтобы доказать непригодность метода Нордмана —Тихова.

Согласно г. Тихову, расстояние *RT* Персея (10-я зв. вел.) составляет 740 световых лет, а запаздывание минимумов для 0,56 и 0,43 μ равно 4 *мин.* Г. Нордман [1] [1] находит для *RT* Персея (2,3 зв. вел.), расстояние которой равно 60 световым годам, отставание минимумов для 0,68 и 0,43 μ в 16 *мин*, для 0,51 и 0,43 μ — в 9 *мин*; для промежутка 0,56 и 0,43 μ получилось бы 11 *мин* [2].

Очевидно, что метод измерения, который дает для одной и той же физической постоянной столь разные значения, должен быть неверным в основе.

Я доказал в своей предыдущей заметке [3], что и г. Нордман [4] держится того же мнения, что запаздывание минимумов объясняется без труда, если искать их причину в физических свойствах переменных звезд; на-

---

[1] Comptes rendus, **146**, p. 384.

[2] В моей заметке (Comptes rendus, **146**, p. 1254, 1908) дисперсия, вычисленная г. Нордманом, по ошибке уподоблена мною дисперсии атмосферного воздуха при 0° и 7 *мм* давления, тогда как нужно 107 *мм* давления.

[3] Comptes rendus, **146**, p. 1254, 1908.

[4] Comptes rendus, **147**, p. 24, 1908.

блюдения и *RT* Персея дают нам блестящее доказательство того, что эти свойства, действительно, вызывают значительно больший эффект запаздывания, чем предполагаемая дисперсия.

Физические свойства носят для каждой звезды индивидуальный характер, и наблюдения монохроматических минимумов для большого числа переменных звезд не могут дать иных результатов, чем наблюдения и *RT* Персея; мне представляется поэтому абсолютно невозможным доказать существование заметной дисперсии света в межзвездном пространстве по методу Нордмана — Тихова.

32. О ДАВЛЕНИИ СВЕТА НА ГАЗЫ [1]

(*Предварительное сообщение*)

Около трехсот лет тому назад Кеплер впервые высказал мысль, что отталкивание кометных хвостов Солнцем вызывается давлением световых лучей на молекулы газов, составляющих кометные хвосты.

Опытные исследования, проведенные за последние годы над давлением света на твердые тела, сделали предположение Кеплера настолько вероятным, что в настоящее время оно принято в астрофизике как не подлежащее сомнению и в замечательных работах Arrenius'a [1] открывается большое значение этого давления для космической физики.

Вычисления абсолютной величины давления света на газовые молекулы на основании линейных размеров этих последних, как они были сделаны впервые Фитцджеральдом[1], а потом Шварцшильдом [1], не принимают в расчет избирательного поглощения молекулы.

Для лучей, поглощаемых газом, газ является абсолютно черным телом, и давление лучей на него обусловлено законом Максвелла; лучи, не поглощаемые газом, на него никакого заметного действия не производят. Поэтому, если на газ падает количество световой энергии E в секунду, а из нее часть a поглощается газом, то давление на газ будет

$$p = \frac{aE}{v},$$

где v есть скорость света.

Каждая молекула газа испытывает давление, т. е. испытывает силу, стремящуюся двигать ее в направлении луча.

Чтобы обнаружить эту силу, испытуемый газ (ацетилен, углекислота) был заключен в сосуд с вертикальными флуоритовыми стенками. Сосуд

[1] Сообщено на заседании Отдела физики I Менделеевского съезда 27 декабря 1907 г.

внутри разделен вертикальной металлической стенкой, не доходящей до флоуритовых окон, так что образуются два связанные друг с другом помещения; если вдоль первого помещения из переднего окошка пропустить горизонтальный пучок света, то газ начнет двигаться по направлению светового пучка и, дойдя до заднего окошка, будет там накопляться и стекать вбок, в соседнее помещение, в котором света нет; в этом помещении газ будет двигаться обратно, чтобы затем снова около переднего окошка втекать сбоку в пучок света в первом помещении.

Чтобы измерить то давление, которое испытывает газ от проходящих через него лучей, можно поток газа во втором помещении (почти) запереть легким подвижным поршнем, подвешенным к коромыслу крутильных весов, и отклонением этого последнего измерять в абсолютной мере давление p, которое испытывает газ в направлении движения света.

Измеряя, с другой стороны, энергию E калориметрически и коэффициент абсорбции a при помощи термоэлементов, мы можем проверить указанное выше соотношение.

Сделанные опыты показывают, что непосредственно наблюденное давление и давление, вычисленное из E и a, сходятся вполне в пределах возможных ошибок наблюдений; ввиду очень больших экспериментальных затруднений при измерении газовых давлений, около одной миллионной доли дины на $см^2$ возможные ошибки в абсолютных величинах могут доходить до 30%, но и при этих ошибках порядок величины явления установлен вне всякого сомнения.

Детальное описание указанных выше опытов будет напечатано в ЖРФО.

33. О КАЖУЩЕЙСЯ ДИСПЕРСИИ СВЕТА В ПРОСТРАНСТВЕ

Открытие запаздывания моментов совпадения спектральных линий для спектроскопической двойной β Aurigae, сделанное Белопольским [1] [1], и открытие некоторых фотометрических особенностей переменных звезд, сделанное почти одновременно с различными приборами Nordmann'ом [1] [2] и Тиховым [1] [3], дало повод названным исследователям объяснить наблюденные явления как результат заметной дисперсии света в пространстве.

Это предположение показалось мне настолько невероятным, что я предпочел[4] вместо того, чтобы приписывать пространству новые свойства, объяснить эти явления физическими особенностями наблюденных звезд; это повело к оживленному обмену мнений по поводу данного вопроса [5].

Так как вопрос о дисперсии света в пространстве имеет принципиальное значение, мне представляется не лишним обсуждение этих явлений.

I. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА В ПРОСТРАНСТВЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

Если мы станем на точку зрения электромагнитной теории света, много раз проверенной экспериментально и столь блестящим образом оправдывающейся, мы можем приписывать дисперсию только среде, состоящей из лишенного дисперсии эфира, наполненного избирательно поглощающими молекулами.

---

[1] Изв. Имп. АН, **21**, стр. 153, 1905.

[2] Comptes Rendus, **146**, p. 266, 383, 1908.

[3] Ibid., **146**, p. 570, 1908; Mitteilungen der Nikolaisternwarte in Pulkowo, № 21, 1908.

[4] Изв. Имп. АН, **24**, стр. 93, 1906; Comptes Rendus, **146**, p. 1254, 1908; **147**, p. 515, 1908.

[5] А. Белопольский. Изв. Имп. АН, **24**, стр.97, 1906; C. Nordmann. Comptes Rendus, **147**, p. 24, 620, 1908; G. A. Tikhoff. Ibid., **147**, p. 170, 1908; J. Stein. [2] Ibid., **147**, p. 288, 1908.

В такой среде дисперсия неразрывно связана с абсорбцией света [1]. Plank [2] вычислил релаксационное расстояние, т. е. толщину слоя, в котором амплитуда уменьшается до доли $1/e$ своей первоначальной величины для среды, в которой дисперсия соответствует дисперсии водорода при 760 *мм* и 0° С (см. табл. 1).

Таблица 1

Спектральная линия	Показатель преломления	Релаксационное расстояние, *см*
B	1,000 142 17	$1,8 \cdot 10^8$
D	1,000 142 94	$1,0 \cdot 10^8$
G	1,000 145 54	$2,7 \cdot 10^7$

Запаздывание света между линиями D и G, которое, согласно предположению Nordmann'a и Тихова, происходит в пространстве, должно лежать в пределах от 0,000 000 01 до 0,000 000 34, т. е. должно равняться дисперсии в водороде при 0° С от 3 до 100 *мм* давления. Для водорода при 3 *мм* давления релаксационное расстояние для линии D будет $2,5 \cdot 10^9$ *см*. Но сквозь такую среду не могла бы достигнуть Земли сколько-нибудь заметная доля света Солнца и звезд. Если мы водород заменим другим газом, обладающим дисперсией, то независимо от того, будем ли мы предполагать, что этот газ в направлении луча распределен равномерно или нет, окончательный результат не изменится: Солнце и звезды останутся невидимыми. Таким образом, исключается возможность, что доступная измерению дисперсия среды может быть объяснена присутствием весомой материи, подчиняющейся известным физическим законам.

Остается гипотеза, что сам эфир может давать дисперсию без абсорбции. Однако это предположение равносильно утверждению, что необходимо сразу оставить все наши электромагнитные теории, так как вопрос о дисперсии в чистом эфире вовсе не принадлежит к числу тех, которые остались незамеченными или на которые не было обращено внимания при научных исследованиях. Предположение, что в чистом эфире решительно нет никакой дисперсии, составляет основу всех электромагнитных теорий, и бесчисленные экспериментальные результаты, притом самые разнообразные (катодные лучи, лучи Рентгена, вся оптика) находятся в полном согласии с этим предположением. Поэтому недопустимо предполагать существование дисперсии в пространстве в качестве временной астроно-

[1] Связь между дисперсией и абсорбцией имеет место для всевозможных колебаний, упругих и звуковых, и не ограничивается, следовательно, электромагнитными процессами.

[2] Sitzungsberichte der Berliner Acad., 748, 1904.

мической гипотезы для объяснения наблюденных явлений; такое предположение можно выдвигать только после зрелого критического исследования его основы и при ясном сознании его огромного значения.

В последующем я попытаюсь показать, что положительные указания на дисперсию света в пространстве, которые, как полагают Nordmann и Тихов, ими найдены, не дают повода для пересмотра наших электромагнитных теорий, так как примененные методы принципиально неприложимы, и указанный положительный результат иллюзорен.

II. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ ДВОЙНАЯ β AURIGAE

Тихов следующим образом пользовался спектроскопическими данными относительно этой звезды, добытыми как им самим, так и Белопольским. На основании спектрограмм, сделанных для двух областей, «голубой» ($\lambda = 442$ до $\lambda = 462$) и «фиолетовой» (от $\lambda = 393$ до $\lambda = 410$), он вычисляет эпохи совпадения линий и находит, что для «фиолетовых лучей» эпоха запаздывает на 0,015 дня сравнительно с «голубыми» лучами; отсюда Тихов заключает о доступной измерению дисперсии в пространстве.

В своем вычислении он делает молча гипотезу, что все «голубые» спектральные линии и все «фиолетовые» совпадают одновременно (т. е. отличаются менее, чем на 0,005 дня, и измерены без систематических ошибок). Эта гипотеза, однако, ложна и, следовательно, вычисление Тихова иллюзорно; цитированное выше исследование содержит лишь средние значения, которые не позволяют указать сделанную ошибку. Чтобы нагляднее показать эту ошибку, я привожу в табл. 2 непосредственные измерения [1], ограничиваясь тремя «фиолетовыми» линиями ($\lambda_1 = 393$, Ca; $\lambda_2 = 405$, Fe; $\lambda_3 = 408$?), для которых наблюденные данные всего обширнее в области, соседней со второй эпохой совпадения, приблизительно на расстоянии 2,00 дней. Материал собран для различных эпох E, которые отсчитываются в днях от момента первого совпадения; $V_1 V_2 V_3$ дают разности измеренных скоростей, выраженные в километрах в секунду, обоих солнц двойной звезды на основании измерений Белопольского (Б) и Тихова (Т). Как указывает Тихов, скорости (V) хорошо изображаются формулой

$$V = 222\ \text{км}\cdot\sin\frac{360^{\times}E}{3{,}9599}.$$

С помощью этой формулы я подсчитывал эпохи $C_1 C_2 C_3$ совпадения линий из каждого отдельного наблюдения и для каждой пластинки составил разности $C_1 - C_2$ и $C_2 - C_3$.

[1] Эти измерения я заимствую из труднодоступного сочинения Тихова на русском языке «Попытка исследования дисперсии в межзвездном пространстве на основании наблюдений спектроскопической двойной β Aurigae» в Известиях Горного училища в Екатеринославе, стр. 32, 33, 1905.

Таблица 2

E, дней		$\lambda_1 = 393$ V_1, км	$\lambda_2 = 405$ V_2, км	$\lambda_3 = 408$ V_3, км	C_1, дней	C_2, дней	C_3, дней	$C_1 - C_2$, дней	$C - C_3$, дней
1,407	Т	181,7	—	179,6	2,012	—	2,001	—	—
	Б	174,5	170,9	185,0	1,977	1,877	2,191	+0,100	—0,314
1,480	Т	160,6	150,5	162,4	1,990	1,951	1,977	+0,039	—0,046
	Б	163,6	156,7	157,2	2,003	1,973	1,996	+0,030	—0,023
1,585	Т	144,2	130,1	136,9	2,031	1,910	2,004	+0,121	—0,094
	Б	143,6	125,1	132,2	2,029	1,962	1,987	+0,067	—0,025
2,249	Т	—92,3	—98,4	—	1,979	1,960	—	+0,019	—
2,366	Т	—118,5	—129,5	—103,3	2,011	1,973	2,061	+0,038	—0,088
	Б	—116,2	—122,7	—110,0	2,019	1,993	2,039	+0,026	—0,046
2,404	Т	—145,1	—132,2	—130,2	1,955	2,002	2,009	—0,047	—0,007
	Б	—139,1	—139,9	—132,0	1,977	1,974	2,003	—0,003	—0,029
2,442	Т	—146,1	—138,1	—142,3	1,989	2,019	1,989	—0,030	—0,030
2,583	Т	—173,0	—171,1	—	2,020	1,028	—	—0,008	—
	Б	?	—184,6	—157,3	?	1,969	2,087	—	—0,118
2,629	Т	—184,3	—182,9	—	2,012	2,017	—	—0,005	—
2,632	Т	—144,4	—196,7	—178,3	2,186	1,946	2,044	+0,249	—0,098
	Б	—157,3	—198,1	—181,5	2,136	1,935	2,029	+0,201	—0,093

Как мы будем вычислять средние значения $C_1 - C_2$ и $C_2 - C_3$ из наблюдений, которые кажутся слишком несогласными и ненадежными, — это не влияет на результат. Безусловно существует систематическая разность эпох совпадения $C_1 - C_2$ в размере около $+ 0,02$ дня и для $C_2 - C_3$ около $- 0,04$ дня, что приложимо к измерениям каждого из наблюдателей на снимках, сделанных одновременно (для всех трех линий) на одной и той же пластинке.

Отсюда следует, что недопустимо соединять вместе разультаты для отдельных «фиолетовых» линий, выводить из них среднее значение, как это сделал Тихов, сравнивать его с таким же средним значением для «голубых» линий (на основании снимков на различных пластинках, с различными инструментами и в разное время сделанных) и выводить отсюда разность в 0,015 дня, потому что эта разность не может иметь никакого настоящего физического смысла.

На основании приведенных данных достаточно очевидно, что предложенный Тиховым [1] метод исследования дисперсии в пространстве, основанный на измерениях разности эпох совпадения [2], принципиально непригоден; иначе мы принуждены были бы утверждать, что дисперсия «нормальна» в области от $\lambda = 393$ до $\lambda = 405$ и «аномальна» в области от $\lambda = 405$ до $\lambda = 408$.

Разность эпох совпадения, очевидно, объясняется индивидуальными особенностями звезд, а не свойствами пространства.

III. СМЕЩЕНИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ МИНИМУМОВ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД

На основании наблюдений переменных звезд со светофильтрами в приблизительно монохроматическом свете, Nordmann, пользуясь непосредственными фотометрическими измерениями, и Тихов, при помощи определений фотографической густоты зачернения, нашли в согласии друг с другом, что эпохи минимума в желтом свете заметно упреждают минимум в фиолетовом свете.

Так, Nordmann находит для β Persei разность во времени наступления минимума в 16 *мин* для линий $\lambda = 680$ и $\lambda = 430$ и 9 *мин* для $\lambda = 510$ и $\lambda = 430$. Из этих данных можно вычислить разность в 11 *мин* для интервала от $\lambda = 560$ до $\lambda = 430$. Тихов находит для *RT* Persei разность в 4 *мин* для того же интервала в спектре.

Но если мы сопоставим результаты определения дисперсии, сделанные двумя наблюдателями, и заметим, что, по Nordmann'у, расстояние

---

[1] Memorie Spett. Ital., **27**, p. 107, 1898.

[2] Сравнение эпох совпадения имело бы физическое основание только для линий одной и той же спектральной серии элемента. Это обстоятельство Тихов упустил из виду.

β Persei определяется в 60 световых лет, в то время как *RT* Persei, по Тихову [1], находится в расстоянии 740 световых лет, мы получим отношение

$$\frac{11}{60} : \frac{4}{740} > 30 : 1.$$

Метод, дающий столь различные результаты для одной и той же постоянной, не может быть признан правильным и, следовательно, является совершенно неприменимым.

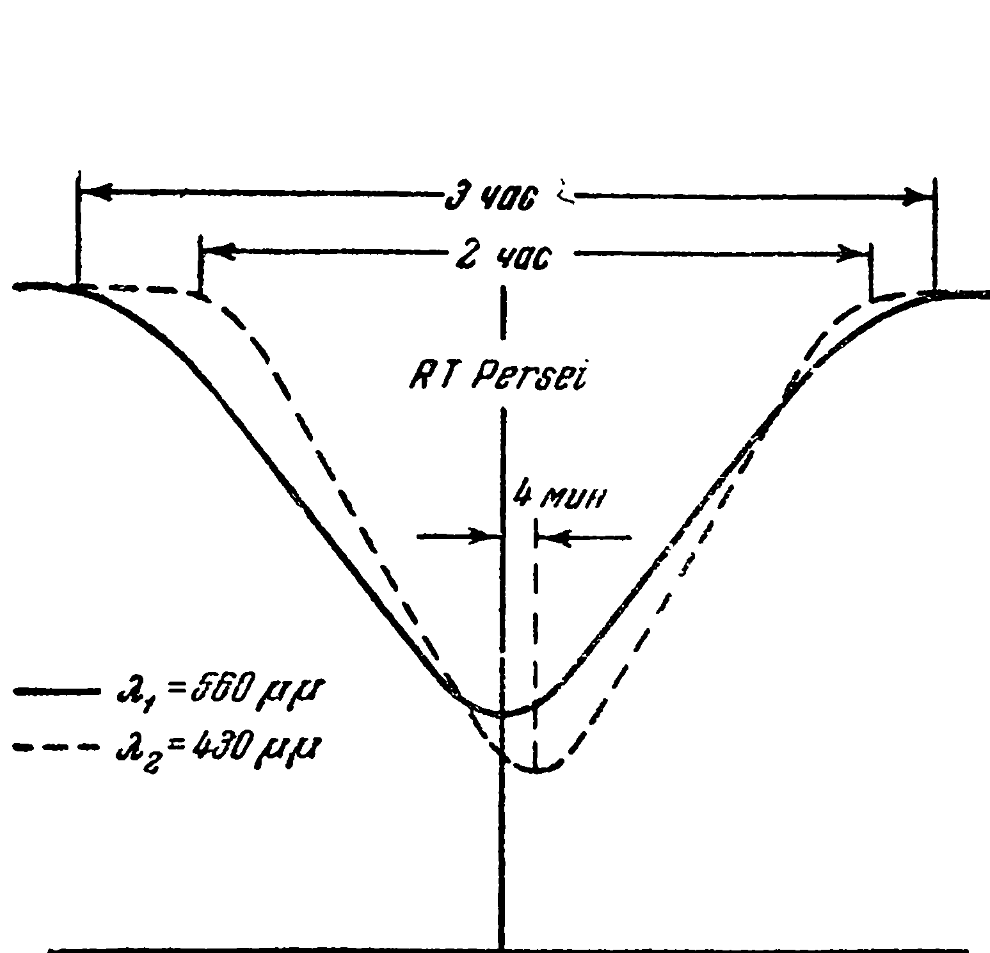


Рис. 1.

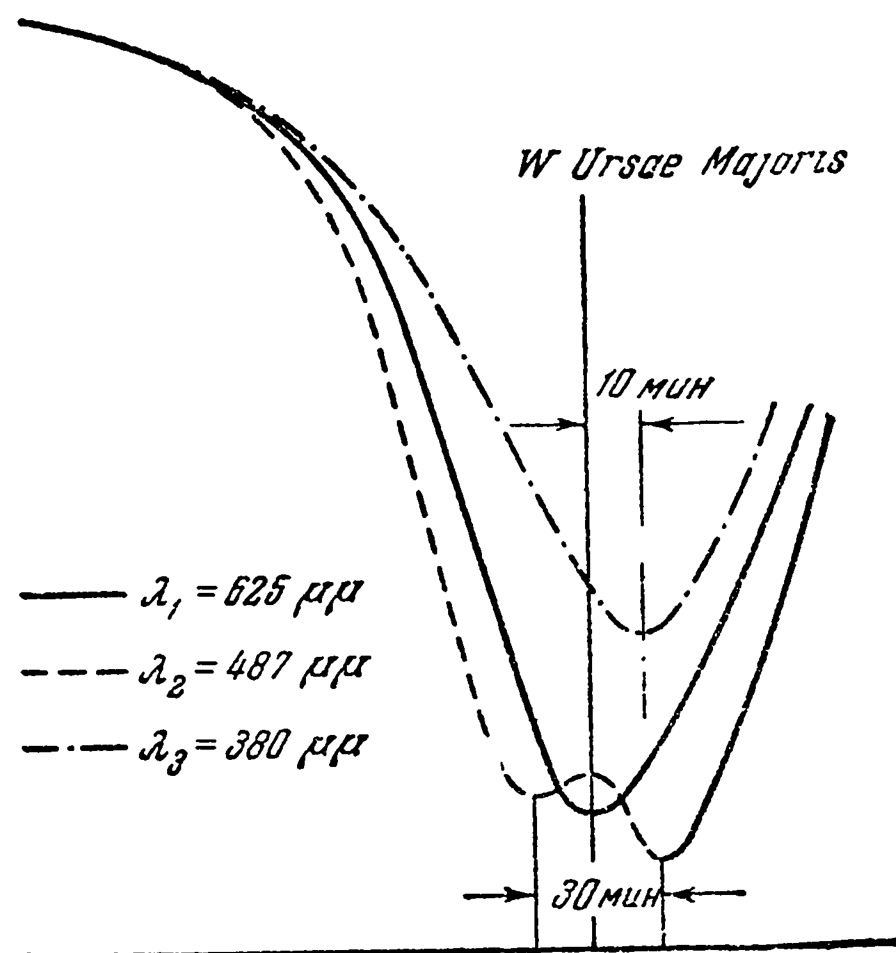


Рис. 2.

Результаты, полученные для других звезд (λ Tauri, *W* Ursae majoris), не позволяют сделать сравнений, так как их параллаксы неизвестны. Кривые, полученные в монохроматическом свете, отличаются весьма значительно друг от друга. Рис. 1 представляет результаты измерений Тихова для *RT* Persei, *W* Ursae majoris[2]. То обстоятельство, что монохроматические кривые не только сдвинуты параллельно друг другу, является доказательством, что их ход обусловливается индивидуальными оптическими свойствами звезды или несовершенствами метода исследования, а не дис-

---

[1] Comptes rendus, 137, p. 171, 1908.

[2] Форма и положение минимумов, как они даются Тиховым, могут быть приняты с осторожностью: фотографический метод неправильно применен к этим исследованиям, он дает интегральное действие за сравнительно продолжительную экспозицию (для *RT* Persei от 10 до 20 *мин*), и тонкие детали минимума остаются скрытыми. Поэтому непосредственное фотометрирование, применяемое Nordmann'ом, гораздо более соответствует цели, так как оно дает значение интенсивности, соответствующей данному моменту; к сожалению, эти измерения еще не опубликованы.

персией света. Поэтому физически невозможно, не исследуя всего хода кривых, определять из них моменты минимума и рассматривать промежутки между этими моментами как доказательство, что свет распространяется в пространстве с заметной дисперсией. Если бы мы логически стали распространять этот принцип и дальше, то мы должны были бы считаться с возможностью утверждения, что зеленый свет, исходящий от *W* Ursae majoris, распространяется в пространстве с двумя различными скоростями.

IV. ФИЗИКА ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗД

Смещение моментов совпадения линий для β Aurigae, так же как и смещения монохроматических минимумов для *RT* Persei, можно просто объяснить физическими процессами, происходящими на переменных звездах. Ниже я предполагаю указать на два процесса, которые могли бы сообщить звездам указанные оптические свойства.

Система β Aurigae, по данным Vogel'я[1] [1], состоит из двух солнц, очень близких друг к другу; поэтому необходимо допустить, что поглощающие массы газа, которые окружают эти солнца, находятся при различных давлениях на сторонах, обращенных друг к другу, и на сторонах, противоположных.

Наблюдатель сравнивает совпадения линий двух поглощающих слоев (*a* с *B* и *A* с *b*, рис. 3), которые находятся при разных давлениях и у которых, следовательно, как показал Humphreis, линии спектра смещены. Совпадение линий у них будет замечаться не во время прохождения звезд через луч зрения, а при таких скоростях в направлении луча зрения, когда допплерово смещение как раз соответствует смещению, обусловленному давлением: эпохи совпадения будут отличаться для различных линий, что и согласуется с открытием Белопольского относительно β Aurigae.

Он удовлетворительно доказывает, исходя из монохроматических кривых затмения, что затмевающее тело обладает атмосферой с избирательным поглощением, так как иначе нельзя объяснить очевидную разницу амплитуд этих кривых.

Мы должны предположить, что в случае *RT* Persei фиолетовая поглощающая атмосфера, затмевающая в течение двух часов, теснее охватывает спутника, чем желтая поглощающая атмосфера, затмевающая в течение трех часов. Если мы предположим, что эти атмосферы не вполне концентричны и что их оптические центры тяжести смещены относительно друг друга на одну тридцатую часть своего диаметра по направлению скорости на орбите, то измеренное Тиховым смещение монохроматических минимумов объясняется количественно.

---

[1] Sitzungsberichte der Berliner Acad., p. 514, 1904.

Такая ассимметрия может быть объяснена вращением спутника около оси. Термическое действие центрального тела C (рис. 4) с дневной стороны D может производить такие изменения в распределении атмосферы, что может получиться заметное различие в границах элементов атмосферы, поглощающих фиолетовый и желтый свет, на утренней M и вечерней E стороне спутника.

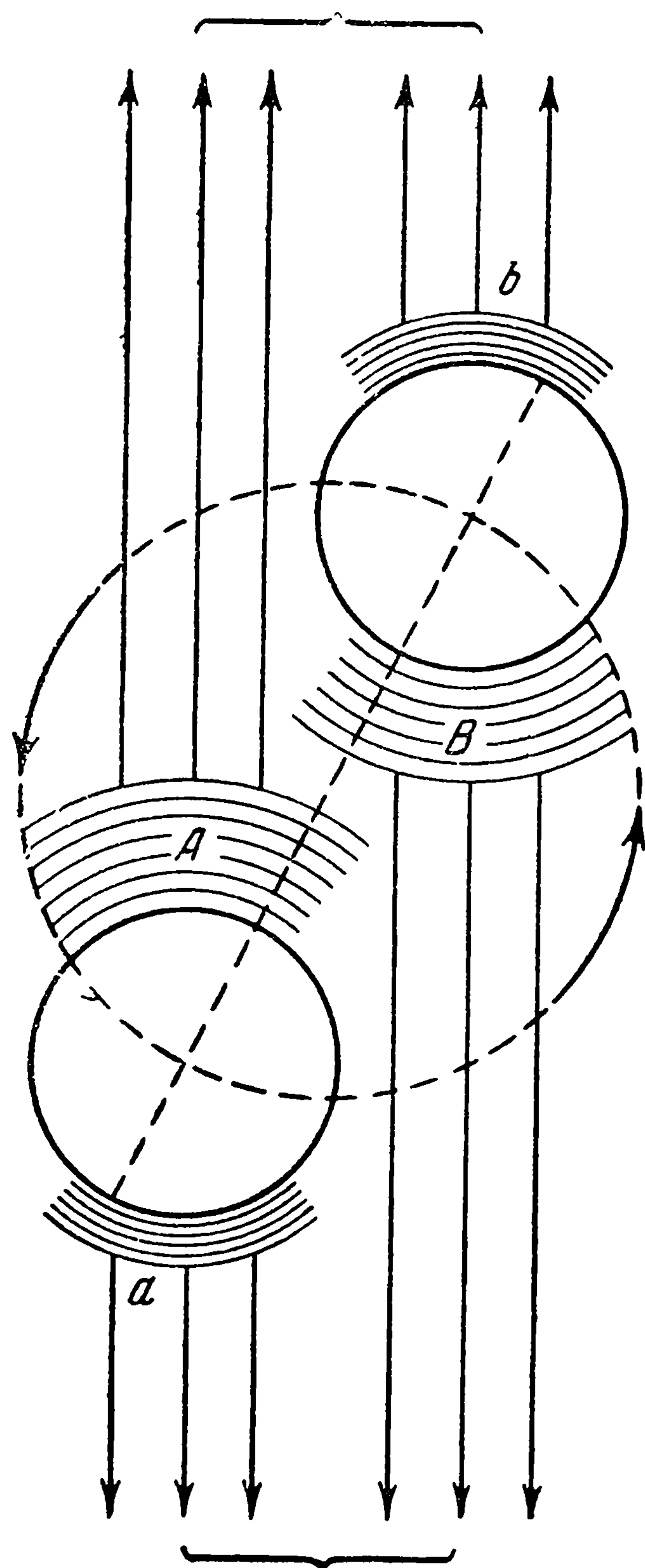


Рис. 3.

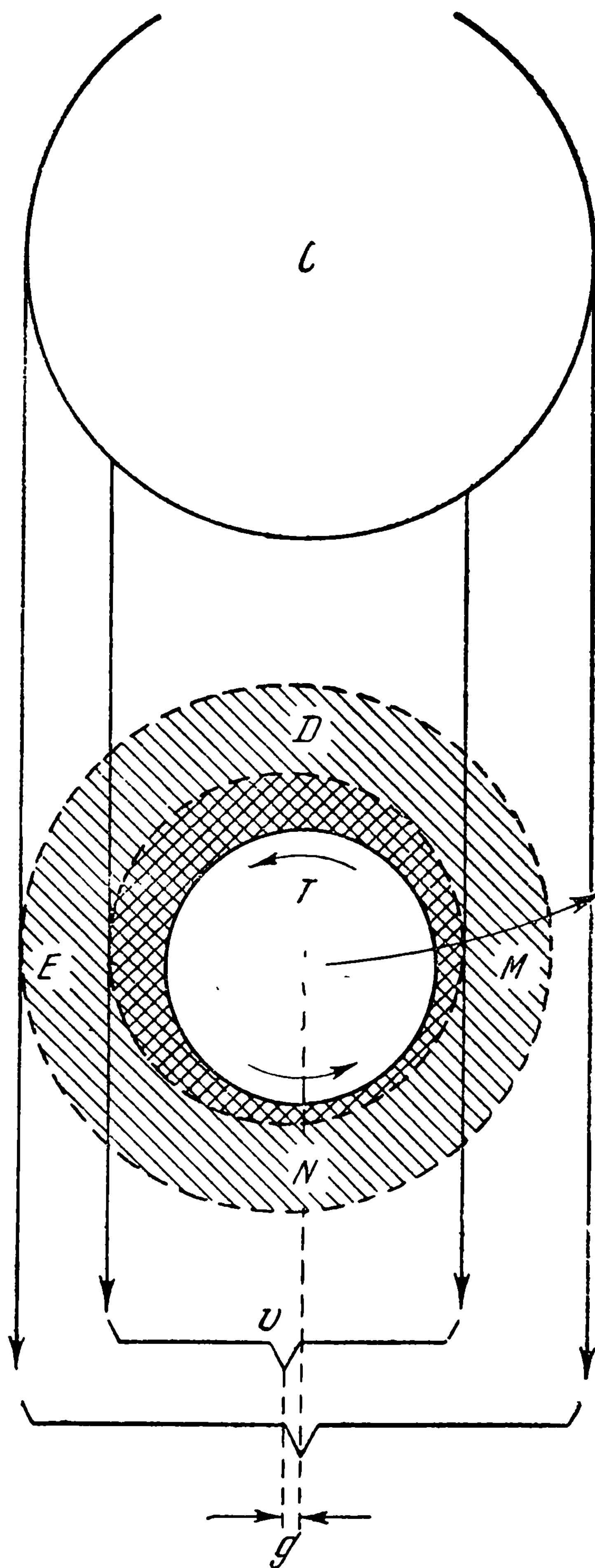


Рис. 4.

Такой случай происходит в малом масштабе и в нашей планетной системе. Если бы кто-нибудь наблюдал с Луны солнечное затмение в инфракрасных лучах $\lambda = 3{,}0\mu$, для которых водяной пар прозрачен, то он

заметил бы смещение этих монохроматических минимумов, так как абсолютная влажность земной атмосферы больше на вечерней стороне, чем на утренней.

Это смещение измеряется долями секунды для затмения, производимого Землей; но при затмении, производимом большим спутником, движущимся вблизи центрального тела, это смещение может возрасти до нескольких минут.

Но не одни только термические явления могут оказывать здесь действие; как замечает Nordmann [1], явления прилива в атмосферах центрального тела и спутника должны давать начало сильной оптической асимметрии.

Имеющихся в распоряжении данных наблюдений недостаточно для того, чтобы глубже проникнуть в строение звезд β Aurigae или RT Persei. Приведенные выше соображения относительно строения этих систем имеют лишь цель показать, как можно объяснить известными уже физическими процессами явления, приписываемые Nordmann'ом и Тиховым дисперсии света в пространстве. Так как эти процессы весьма сложны для каждой данной звезды и количественно нам совершенно неизвестны, то ясно, что методы Тихова и Nordmann'а не позволяют отделить дисперсию в пространстве, если бы даже она существовала, от действия этих факторов, и потому такая дисперсия принципиально не может быть доказана.

Из всего сказанного выше следует, что теперь так же, как и прежде, мы должны считать в согласии со всем нашим опытом в области электромагнитных процессов, что пространство абсолютно лишено какой бы то ни было доступной измерению дисперсии света.

Москва. Ноябрь 1908.

---

[1] Comptes Rendus, 147, p. 24, 1908.

34. ФОНОМЕТР

В. Д. Зернов [1] [1] показал, что диск Рэлея представляет собою надежный прибор для абсолютных измерений силы звука, которым с успехом можно пользоваться и для измерений силы человеческого голоса.

На том же принципе оказалось возможным построить фонометр, который обладает несколько большею чувствительностью, устанавливается апериодически и не требует особой осторожности при переноске; этот фонометр предназначается для сравнительных измерений силы звука, но он может служить также и для абсолютных измерений, если показания его предварительно сравнить с показаниями диска Рэлея.

Подвижную часть фонометра составляет прямоугольник из посеребренного покровного стекла, который одновременно служит и для зеркального отсчета. Сила, с которою звуковая волна вращает такой прямоугольник, была теоретически указана лордом Рэлеем [2]. Простое рассуждение показывает, что чувствительность прибора при заданном периоде его колебания не зависит от высоты прямоугольника и возрастает с уменьшением его ширины; ввиду того что для получения хороших изображений зеркало для отсчетов не следует брать уже 3 *мм*, эту ширину пришлось дать и подвижной части фонометра: при высоте около 15 *мм* такое зеркало отражает еще достаточное количество света.

Зеркальный прямоугольник R (рис. 1) укреплен на тонком стеклянном стержне GG, который внизу снабжен легкой лопаточкой F из алюминия (служащей для успокоения колебаний системы), а верхним концом прикреплен к кварцевой нити Q; период простого колебания системы около двух секунд.

Приспособление, поддерживающее эту подвешенную систему, укреплено на треножнике с тремя установочными винтами (на чертеже не

---

[1] В. Зернов. ЖРФО, 40, стр. 70, 1908.

[2] Lord Rayleigh. Philos. Mag., 2, p. 436, 1876; Scient Papers, 1, p. 287.

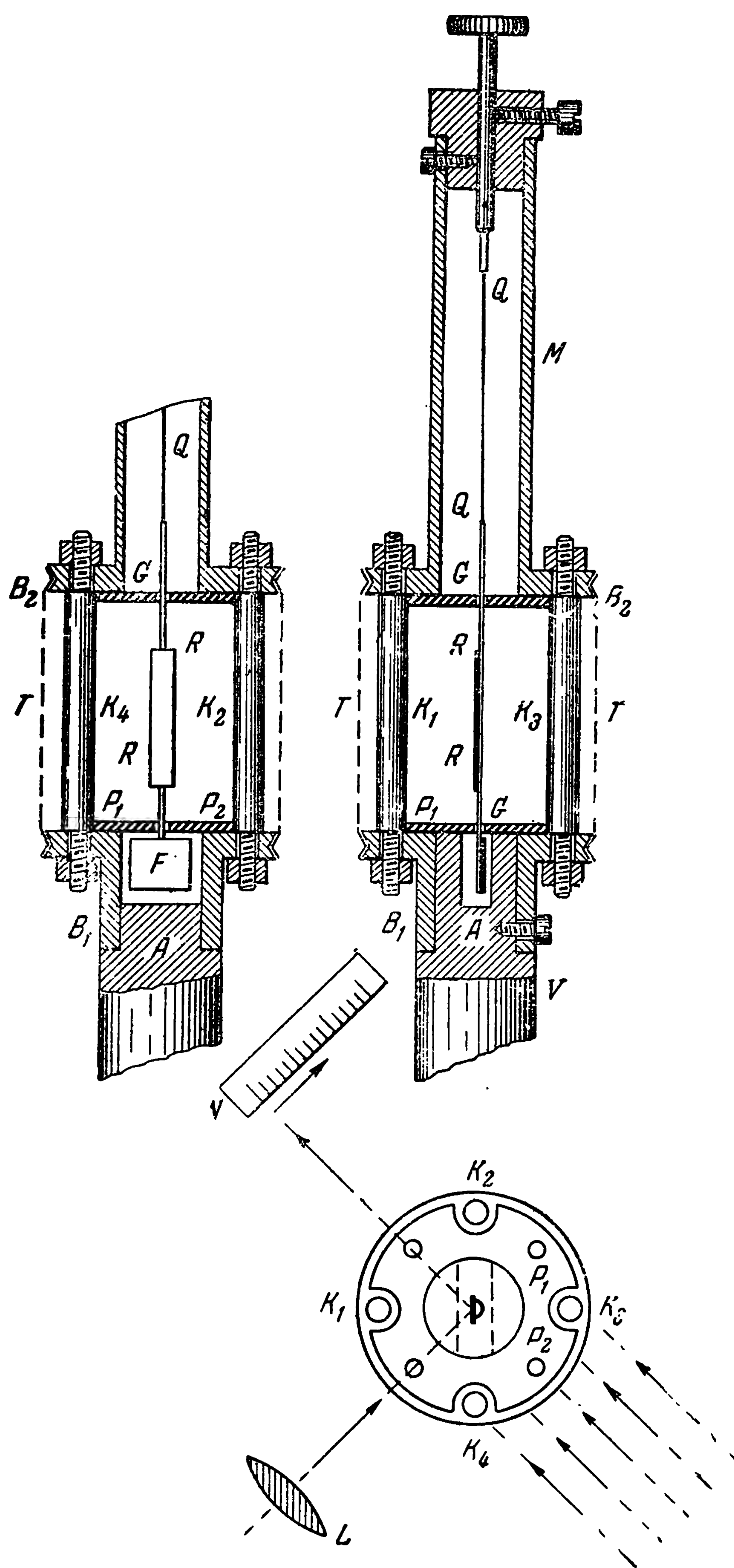


Рис. 1.

показанными): латунная стойка V, снабженная в верхней части прорезом A, в который входит алюминиевая лопаточка F; при малых направляющих силах кварцевой нити Q существенно необходимо этот прорез A выложить алюминиевой пластинкой, чтобы избежать притяжения алюминиевой лопаточки F латунными стенками выреза A, происходящего от разницы контактных потенциалов.

Когда прямоугольник R подвешен, то две латунных пластинки P_1 и P_2 привинчиваются снизу к нижнему диску B_1B_1 а две другие P_3P_4 —сверху к верхнему B_2B_2 таким образом, что полукружные вырезы их обхватывают стеклянный стержень GG, не касаясь его: при помощи этих пластин воздушные объемы как в медной трубке M, так и в вырезе A отрезаются от проходящей звуковой волны. Если опустить подвес так, чтобы лопаточка F уперлась в дно выреза A, то весь прибор можно переносить или перевозить в любом положении, не рискуя оборвать нить Q.

Оба диска B_1B_1 и B_2B_2 удерживаются и скреплены между собою четырьмя тонкими колонками $K_1K_2K_3K_4$ в 25 *мм* высоты

каждая. Звуковые волны падают под углом в 45° к нормали прямоугольника; изображение щели или стержня лампы накаливания пролагается при помощи линзы L на шкалу N.

Чтобы защитить подвижную систему от случайных воздушных течений, между дисками B_1B_1, и B_2B_2 натянута цилиндрическая оболочка TT из тонкого черного тюля: она не уменьшает заметно ни звуковой чувствительности прибора, ни ясности изображения на шкале.

В большой аудитории легко показать сравнение силы звуков различных инструментов, а также распределение силы звука в гамме, спетой или сыгранной на духовом инструменте (тромбон, корнет-а-пистон).

Описанный прибор был изготовлен университетским механиком П. И. Громовым.

Физический институт Университета.
Москва. Сентябрь 1909.

35. СВЕТОВОЕ ДАВЛЕНИЕ

Когда пучок лучей падает на какое-либо тело, то одна часть падающих лучей отражается, а другая их часть или проходит сквозь тело (прозрачное), или поглощается им (непрозрачное). Мы можем объяснить эти явления и даже предвидеть ход лучей в бесконечном числе частных случаев, если, следуя Максвеллу, предположим, что волны света суть электромагнитные волны, волны того же рода, как те, которые мы в настоящее время можем возбуждать искусственно электрическими процессами и которыми мы пользуемся для беспроволочной телеграфии. Разница заключается лишь в том, что длины волн, употребляемых в беспроволочной телеграфии, достигают сотен метров, тогда как электромагнитные волны светового пучка приблизительно в миллиард раз меньше и измеряются сотнями одной миллионной доли миллиметра.

Когда Максвеллу удалось объяснить все известные нам свойства светового пучка, исходя из представления об электромагнитной природе света, то он же указал и на то, что его гипотеза неразрывно связана с новыми, до тех пор неизвестными, магнитными и электрическими силами света: световые лучи должны оказывать давление на все тела, на которые они падают. То обстоятельство, что эта особенность светового пучка до того времени ускользала от наблюдателей, легко объясняется малой величиной этих сил давления: Максвелл вычислил в 1873 г., что при ясном небе, в полдень давление солнечных лучей на поверхность в 4 $м^2$ едва достигает величины тысячной доли грамма.

Совершенно иным путем, независимо от Максвелла и, как кажется, не зная его работ, Бартоли [1] (1879 г.) также пришел к заключению, что световые лучи должны производить давление на тела. Бартоли исходит из известного основного факта, который в теории тепла называется вторым принципом термодинамики, — именно, что невозможно без затраты работы перевести тепловую энергию с более холодного тела на более теплое. Бартоли указал на то, что всякое тело испускает лучи и что, в принципе,

вполне возможно построить машину, состоящую из полого абсолютно зеркального цилиндра с перемещающимся в нем зеркальным поршнем; при помощи этой машины могли бы, выдвигая поршень, всасывать в цилиндр лучистую энергию холодного тела, потом, перенеся цилиндр к теплому телу, переводить в это последнее лучистую энергию, вдвигая поршень подобно тому, как при помощи садового насоса мы можем всасывать воду и выпрыскивать ее на значительную высоту. Хотя практическому выполнению такой машины и представляются огромные трудности, тем не менее, принципиально, возможность ее выполнения вполне обеспечена, и поэтому Бартоли заключил, что второй принцип термодинамики только в том случае не будет нарушен, если переведение лучистой энергии из холодного тела в более теплое тело будет происходить с затратой работы. Другими словами, перемещение поршня должно преодолевать некоторую силу, обусловленную давлением лучей на поршень.

Таким образом, Максвелл и Бартоли пришли к одинаковому утверждению, что световые лучи давят на те тела, на которые они падают [1].

Бартоли сделал попытку опытным путем проверить это теоретическое предположение, но, несмотря на свою большую ловкость, не мог достигнуть поставленной цели, потому что те средства, которыми располагало экспериментальное искусство его времени, не были достаточными.

В течение последующих двадцати лет средства экспериментальной техники разрослись в непредвиденном масштабе: даже в скромно оборудованных лабораториях экспериментатор мог располагать мощными источниками света в виде электрических дуговых ламп, а новые ртутные насосы позволили ему без затруднения разрежать воздух до одной миллионной доли атмосферы.

Таким образом, настало время, когда экспериментальное исследование светового давления стало возможным, и после трехлетней работы мне удалось сделать эти опыты (1900 г.).

Расположение моих опытов было следующее: в стеклянном баллоне, который был очень тщательно выкачен, висело на очень тонкой стеклянной нити маленькое горизонтальное коромысло, на конце которого были прикреплены крылышки, в пять миллиметров в диаметре, изготовленные из платины, алюминия, никеля или слюды. При помощи линз свет дуговой лампы мог быть направлен на эти крылышки; возникавшие силы давления света могли быть измерены тем, что свет, падая на крылышко,

---

[1] Для случая, когда пучок параллельных лучей нормально падает на плоскую поверхность как Максвелл, так и Бартоли нашли, что величина светового давления

$$p = (1 + \rho)\frac{E}{v},$$

где E — количество световой энергии, падающей на поверхность в одну секунду, v — скорость света, а ρ — коэффициент отражения поверхности; для черной поверхности $\rho = 0$, тогда как для вполне зеркальной поверхности $\rho = 1$.

заставлял его двигаться и закручивать стеклянную нить подвеса до тех пор, пока не наступало равновесие; когда же доступ света прекращался, то крылышко возвращалось в свое прежнее положение. Величина экспериментально измеренного отклонения крутильных весов и величина отклонения крылышка, вычисленная по теории Максвелла—Бартоли из измеренной величины падающей энергии светового пучка, вполне совпадали друг с другом в пределах возможных ошибок наблюдений.

Почти одновременно с моею работой появилось аналогичное исследование Никольса [1] и Гулля [1] (1901 г.), которые исследовали давление света на серебряное зеркало, а несколько позднее Пойнтинг (в 1903 г.) опубликовал исследование некоторых особенно интересных частных случаев давления света.

Я позволю себе еще добавить, что мне недавно удалось измерить давление света на газы [1]. Мне удалось экспериментально показать, что пучок лучей, пронизывающий газ, увлекает отдельные молекулы его в направлении своего движения. Как и следовало ожидать по теории Максвелла — Бартоли, силы давления, наблюдаемые в этом случае, были приблизительно еще в сто раз меньше сил давления света на твердые тела.

На основании всего изложенного выше, в настоящее время мы можем утверждать, что существование сил светового давления, как со стороны теоретического обоснования Максвеллом и Бартоли, так и со стороны полного экспериментального обследования этих сил, вне сомнения, является вполне доказанным.

Этот результат получает дальнейшее подтверждение в общей теореме лорда Рэлея (1902 г.), что не только свет, но что вообще всякое волнообразное движение при его распространении производит давление на тела, на которые оно падает, и что, в согласии с законами, которым подчиняется световое давление, давление всякого волнообразного движения прямо пропорционально величине падающей энергии и обратно пропорционально скорости распространения его колебания. Этот общий теоретический результат блестяще выдержал и экспериментальную проверку: Капцов (в 1903 г.) показал, что волны, распространяющиеся по поверхности покоящейся воды, производят давление на плавающие тела в направлении своего движения. Давление звуковых волн было демонстрировано Альтбергом [1] (1902 г.); когда звуковые волны падают на отражающую их стену, то у этой последней образуется некоторый избыток давления, который стремится двигать отражающую стену, удаляя ее от источника звука.

Существование светового давления приводит нас к заключениям, которые в двух направлениях углубляют и расширяют наши знания; оно позволяет нам, с одной стороны, теоретически обосновать законы излучения

---

[1] Эта работа была доложена на XII Съезде естествоиспытателей и врачей в Москве.

теплых тел, а с другой, — дать простое объяснение некоторым явлениям, с которыми знакомит нас астрофизика.

Больцман (1883 г.), развивая соображения, высказанные Бартоли, поставил вопрос: в какой степени силы светового давления, а следовательно и самое излучение, должны зависеть от температуры тела для того, чтобы второй принцип термодинамики был удовлетворен. Рядом остроумных соображений ему удалось установить законы, которые связывают излучение с температурой. Длинный ряд опытов, предпринятых для проверки этих законов, показал их полную правильность, и они дают нам в настоящее время ответы на целый ряд вопросов, касающихся излучения Солнца и наших искусственных источников света. Полученными результатами отнюдь не исчерпывается область приложения законов светового давления, указанная Больцманом, и большое число проблем, связанных с излучением, а следовательно и с величинами светового давления, еще ждет обстоятельной обработки.

В другом направлении, в астрофизике, еще задолго до того, как Максвелл и Бартоли теоретически обосновали явления светового давления, оно уже получило приложение для объяснения особенностей форм кометных хвостов; почти три столетия тому назад великий Кеплер (1617 г.) положил фундамент для обработки астрономических задач, когда высказал предположение, что кометные хвосты, исходя из голов комет, всегда развиваются в направлении, противоположном Солнцу, и что они могли бы быть легко объяснены, если бы солнечным лучам приписать силы давления, которые увлекают с собой материю хвостов. С течением времени предположение Кеплера, не получив необходимого обоснования, было забыто, и только в новейшее время, основываясь на теоретическом и экспериментальном фундаменте, Аррениус [1] в 1902 году сумел в блестящей форме указать на ту большую роль, которую световое давление играет в космической физике: отталкивательная сила, с которой солнечные лучи действуют на какое-либо тело, как мы видели, весьма мала, но она делается тем заметнее по сравнению с притягательной силой солнечной массы, чем меньшие размеры имеет тело. Легко вычислить, что маленькая свинцовая дробинка притягивается Солнцем приблизительно в сто раз сильнее, чем она отталкивается давлением падающих на нее солнечных лучей, но если мы возьмем шарики, диаметры которых в сто раз меньше диаметра дробинки, то их масса, а вместе с тем и сила, с которой они притягиваются Солнцем, в 1 000 000 раз меньше, чем притяжение дробинки, тогда как их поверхность, а следовательно и величины отталкивания, обусловленные падающими на них солнечными лучами, только в 10 000 раз меньше, чем у дробинки; сила, с которой солнечная масса притягивает эти маленькие шарики, делается равной силе отталкивания, обусловленной солнечными лучами — обе силы равновелики и уравновешивают друг друга. Для тел, размеры которых еще меньше, перевешивают силы давления лучей света, и эти тела отталкиваются Солнцем с силой, во много

раз превосходящей силу их притяжения; таким образом, для всех явлений, которые связаны с движением органической и минеральной космической пыли, силы давления света имеют решающее значение.

В интересной теоретической работе Дебаю удалось (в 1909 г.) пойти еще дальше, вычислить величины давления солнечных лучей на единичные молекулы газов в кометных хвостах и показать, что этими силами вполне объясняются формы кометных хвостов.

В текущем марте, согласно предсказаниям астрономов, мы вновь увидим комету Галлея, роскошным хвостом которой Кеплер восхищался в 1607 году [1]. Нам представится случай в ясные вечера видеть явление, которое, как мы теперь знаем, вне сомнения вызвано силами давления света на газы, и наблюдать его в простейшей форме и в такой красоте, как это явление никогда не может быть наблюдаемо в наших лабораториях.

---

[1] См. «Физическое обозрение», стр. 266, 1909.

36. ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ СВЕТА НА ГАЗЫ

§ 1. Характерные особенности форм кометных хвостов уже триста лет тому назад заставили великого Кеплера [1] высказать предположение, что солнечные лучи производят давление на газообразные вещества, испаряющиеся при прохождении через перигелий в головной части кометы, и заставляют их двигаться прочь от солнца.

Фитцджеральд [2] [1] в свое время старался обосновать это предположение Кеплера, исходя из максвелловского светового давления. Для того чтобы подсчитать величину сил, действующих в этом случае, Фитцджеральд сначала сделал предположение, что, во-первых, молекулы вещества кометных хвостов суть абсолютно черные шары, во-вторых, что давление, которое производит свет на эти маленькие шары, по существу, не отличается от того давления, которое он производит на шары гораздо больших размеров.

Что это последнее предположение не имеет места в случае очень малых шаров, для которых явления дифракции играют первенствующую роль, было выяснено Шварцшильдом [3] [1], который и указал способ точного подсчета сил давления света на абсолютно отражающие шары любых размеров; недавно Дебай [4] нашел общее решение этой задачи для шаров из вещества, отражающего, преломляющего и поглощающего падающие на них лучи света.

Я в свое время [5] обратил внимание на недопустимость предположения, будто можно без всяких оговорок переносить рассуждения, касаю-

---

[1] J. Kepler. 2Dl Cometis. Augustae Vindelicorum, 1619. Opera omnia. Edit. Dr. Ch. Frich, 7, p. 110. Francforti a/M, 1868.

[2] G. Fitzgerald. Proc. Roy. Soc. Dublin, 3, p. 344, 1883.

[3] K. Schwarzschild. Sitzgsber. d. Münch. Ak. d. Wiss. Math. Kl., 31, p. 293, 1901.

[4] P. Debye. Ann. d. Phys., 30, p. 57, 1909.

[5] P. Lebedew. Wied. Ann., 45, p. 297, 1892.

щиеся шаров, на молекулы газа; я указывал, что молекулы газов мы должны рассматривать как отдельные резонаторы, обладающие определенным избирательным поглощением.

Опыты, которые я [1] делал с акустическими резонаторами, показали, что увлекающее действие падающей волны на звуковой резонатор представляет собою резко выраженное и легко наблюдаемое явление, а подсчет (там же стр. 170), который я сделал для электромагнитных волн, позволял предвидеть аналогичное действие световых волн на отдельные молекулы газов. Дебай в вышеуказанной работе подробно рассмотрел действие светового давления на схематическую молекулу (колеблющийся диполь), находящуюся в тех же условиях, как молекула газа кометного хвоста.

§ 2. При экспериментальном исследовании светового давления на газовые молекулы приходится иметь дело не с отдельными молекулами, а с определенным слоем газа, действие на который слагается из действия света на отдельные его молекулы; в этом случае слагающую всех действующих сил легко определить, как это и было указано Фитцджеральдом, если исходить из того простого предположения, что только те лучи могут производить максвелловское световое давление, которые поглощаются данным газом, и по отношению к которым слой газа является черным телом; сила p, с которой пучок параллельных лучей стремится увлечь газ в направлении движения света, т. е. сила p, с которою свет давит на слой газа,

$$p = \frac{\alpha E}{V},$$

где α — коэффициент абсорбции слоя газа для лучистой энергии, E — количество этой энергии, падающей на слой газа в течение 1 *сек*, V — скорость распространения света.

Оптически задача сводится к тому, чтобы найти те силы давления, которые свет производит на однородную плоскопараллельную пластинку, частично поглощающую лучи, но не отражающую их в заметной степени. Эту задачу теоретически исследовали Д. А. Гольдгаммер [2] и Дебай (l. с.).

Силы светового давления были экспериментально изучены; мною [3] — для случая отражающих, поглощающих и прозрачных тел, Никольсом [1] и Гуллем [4] [1] — для случая серебряного зеркала, Пойнтингом [5] [1] — для случаев косвенного падения и полного внутреннего отражения. Благодаря этим исследованиям основное предположение Кеплера

---

[1] P. Lebedew. Wied. Ann., **62**, p. 168, 1897.
[2] D. Goldhammer. Ann. d. Phys., **4**, p. 834, 846, 1901.
[3] P. Lebedew. Ann. d. Phys., **6**, p. 433.
[4] E. Nichols и G. H. Hull. Ann. d. Phys., **12**, p. 225, 1903.
[5] J. H. Poynting. Phil. Mag., (6) 9, p. 169, 393, 1905.

о том, что свет давит на отдельные молекулы газа, становится на твердую почву; поэтому его теория кометных хвостов и вошла так прочно в современную астрофизику. Аррениус [1] [1] указал на то крупное значение, которое силы светового давления должны иметь в известных вопросах космической физики. По этим соображениям я решил экспериментально изучить пондеромоторное действие света на газы, чтобы подвинуть наши знания о максвелловских силах и в этом направлении.

I. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

§ 3. Когда пучок белого света проходит через толщу газа, обладающего избирательным поглощением, то лучи света, производя давление на отдельные молекулы, должны заставлять всю массу газа двигаться в направлении распространения света. Так как коэффициенты поглощения у газов очень незначительны, то и силы, с которыми свет двигает газ, очень малы и даже при наиболее выгодных условиях опыта едва достигают сотой доли того давления, которое тот же пучок света производил бы на черную поверхность. Чтобы иметь возможность измерять эти малые силы, опыт располагался таким образом, что газ свободно мог перемещаться в направлении пронизывающих его лучей и производил давление на очень чувствительный поршневой аппарат, на который лучи света непосредственно действовать не могли. На рис. 1 изображен прибор, служивший для этих исследований: исследуемый газ заполняет объем G (окна которого F_1 и F_2 из флуорита), и пучок света L_1L_2 пронизывает его, не попадая на окружающие стенки. Лучи света производят давление на отдельные молекулы газа и заставляют газ перемещаться в направлении пучка лучей, благодаря чему между окнами F_1 и F_2 образуется некоторая

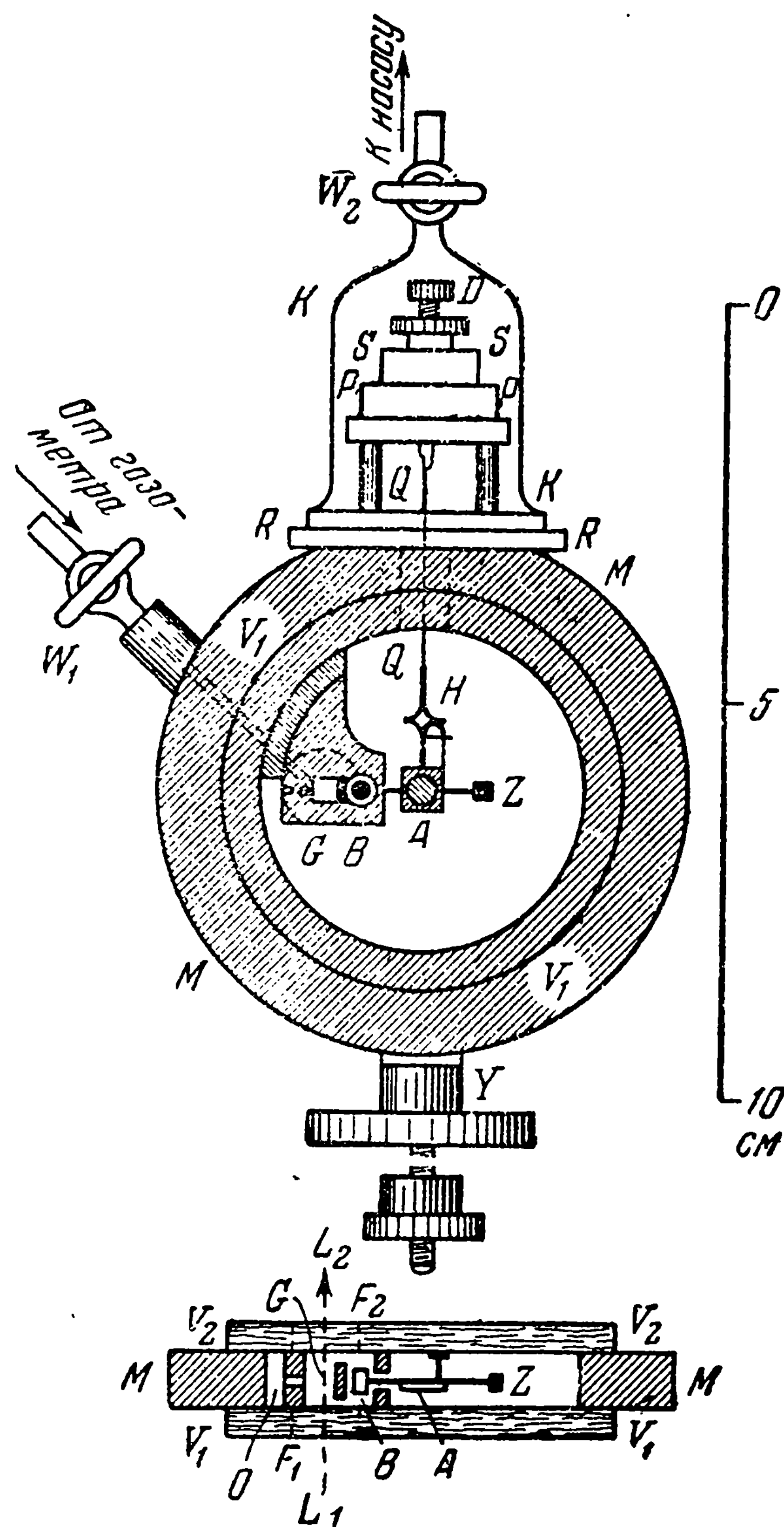


Рис. 1.

[1] Arrhenius. Phys. Zeitschr., 2, p. 81, 97; См. также «Lehrbuch d. kosmischen Physik. Leipzig», 1903 и «Образование миров», 1907.

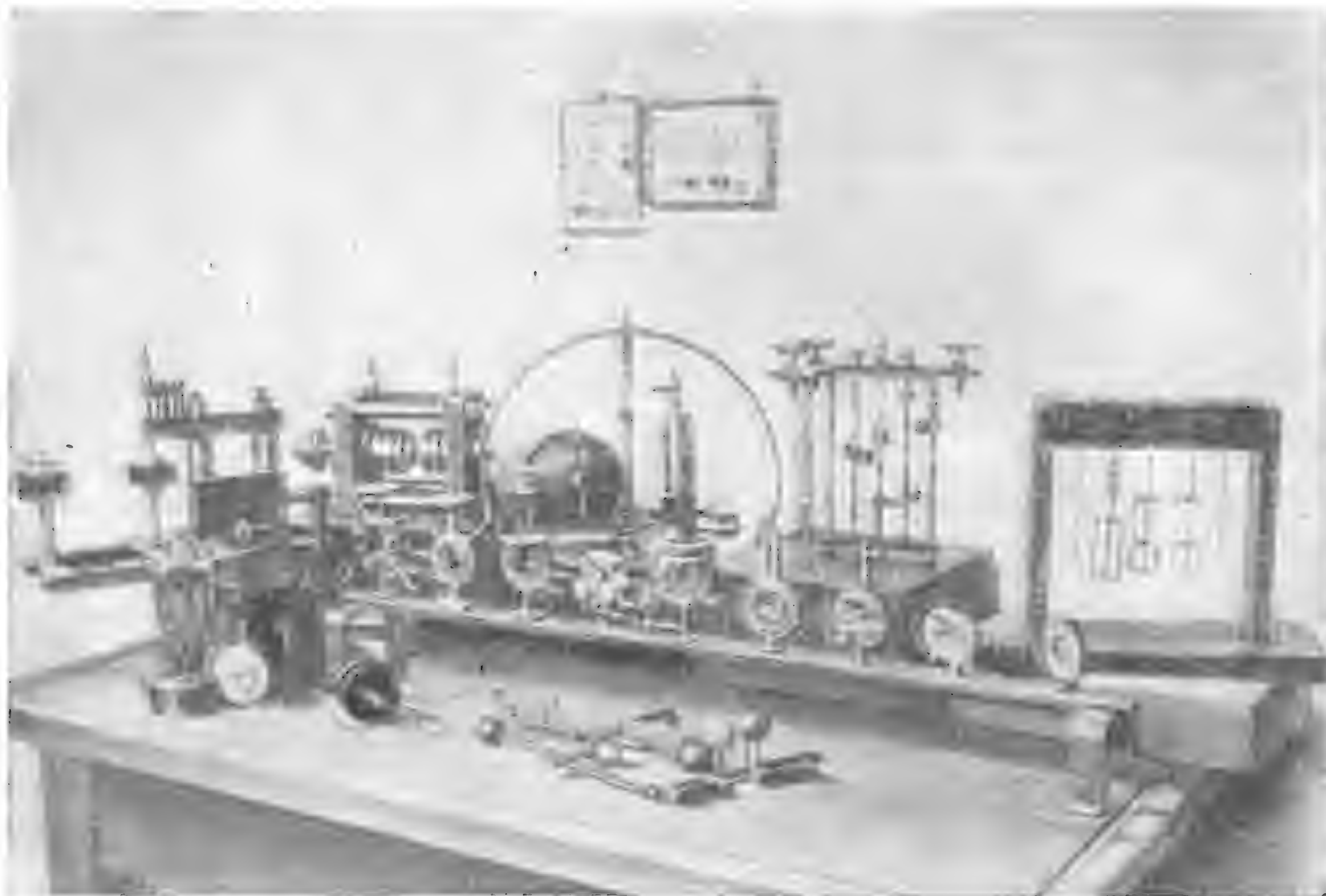


Рис. 2. Приборы, служившие для различных исследований П. Н. Лебедева. Сверху, в небольших витринах,— «Световое давление» и «Короткие электромагнитные волны». Справа, тоже в витрине,— «Действие волн на резонаторы». Слева и сзади — «Магнитометрическое исследование вращающихся тел». В середине — целый ряд приборов для «Светового давления на газы»

разность давлений газов; эта разность давлений стремится выравняться через неосвещенный боковой канал, в котором находится легко подвижной поршень B; поршень B прикреплен к коромыслу T чувствительных крутильных весов, которые закручиваются, как только на поверхностях поршня устанавливается некоторая разница давлений газа [1]. Общее количество подходящей энергии можно смерить калориметрически, коэффициент поглощения — с помощью двух термоэлементов (см. ниже § 8). Если диаметр поршня, длина плеча коромысла, величина направляющей силы кварцевой нити Q и расстояние шкалы от зеркала известны, то нетрудно вычислить в абсолютной мере ту разницу давлений газа, которой соответствует отклонение коромысла на одно деление шкалы. Тогда

[1] Отверстие O устроено для того, чтобы дать выход газу при внезапном освещении и нагревании. На величину образующихся разниц давления и соответственных отклонений поршня B это отверстие O не влияет.

возможно количественно проверить основной закон Фитцджеральда. В описанном приборе 1 дел. шк. = $1{,}4\cdot10^{-6}$ *дин/см²*.

§ 4. Экспериментальное выполнение этих опытов встречает трудности двоякого рода.

a. Свет давит только на те газы, которые его избирательно поглощают, причем величина этого поглощения не одинакова в разных слоях газа: передние слои газа поглощают (и нагреваются) сильнее задних, для которых первые служат светофильтром; при этих условиях в массе газа образуются разности плотностей, вызывающие конвекционные токи, которые, в свою очередь, могут влиять на показание поршневого аппарата. Указанные разности плотностей меняют свое распределение вместе с изменением направления светового пучка, и потому они могли бы обусловливать постоянные ошибки в измерениях абсолютных) величин давления. Систематические исследования этого источника ошибок позволяют, однако, установить, что при правильной установке прибора этих постоянных ошибок можно избежать; опыты показали также, что и при значительных неправильностях в установке прибора указанные ошибки очень малы для смесей испытуемых газов с водородом, почему и все окончательные измерения были сделаны с такими смесями (см. ниже §§ 15 и 16).

b. Те простые соотношения, которые Фитцджеральд указал для пучка параллельных лучей, не поддаются непосредственному экспериментальному исследованию, так как в этом случае энергия светового пучка слишком мала и нам приходится (как указано выше) пользоваться пучком сходящихся лучей, в котором слой газа пронизывается лучами неравномерно: внутри самого газового слоя образуются разности давлений, которые частью выравниваются в самом газе, и строгий количественный подсчет того давления, которое газ производит на поршень прибора, является невозможным (см. ниже § 23) — приходится приблизительно оценивать величины этих пертурбирующих сил, и потому подсчет абсолютной величины давления из измеренных величин α и E не может быть точным. Отдельные измерения E, α и p можно произвести без систематических ошибок, с точностью около 10%; но абсолютное значение констант вследствие указанных выше причин не может претендовать на ту же степень точности, и потому соотношение, указанное Фитцджеральдом, количественно не может быть проверено точнее, чем в пределах тридцати процентов. Я решил ограничить эту проверку указанной степенью точности, так как ее достаточно для решения основного вопроса о существовании светового давления на газы, а получение более точных цифровых данных представляет собою задачу огромной экспериментальной трудности [1].

---

[1] Позволю себе заметить, что и настоящая работа заняла более трех лет времени, в течение которых было построено и исследовано более двадцати поршневых приборов разных типов.

II. ПРИБОРЫ

§ 5. Поршневой прибор (рис. 1, стр. 301) состоял из латунного плоско-полированного тела толщиной около 7 *мм*; внутри него помещалось газовое пространство G (3×4 *мм*), высверленное отверстие для поршня и вырез для коромысла крутильных весов; просвет был герметически закрыт двумя стеклянными пластинками V_1 и V_2, которые были примазаны к латуни салом, употребляемым для смазки кранов, и прижимались каждая тремя зажимами, не показанными на рисунке. Против выреза G стеклянные пластинки просверлены; отверстия закрыты вмазанными флуоритовыми пластинками F_1 и F_2; последние сделаны заподлицо со стеклянными пластинками. На тело MM напаяна латунная же пластинка RR, на которой надет (смазка салом) стеклянный колокол KK. Под колоколом находится приспособление для подвешивания кварцевой нити QQ. С помощью винта D можно нить поднимать, опускать и вращать. Винт D стоит на крестовом суппорте $SSPP$, и поэтому можно также передвигать нить по направлению лучей и по перпендикулярному направлению и закреплять ее в любом положении.

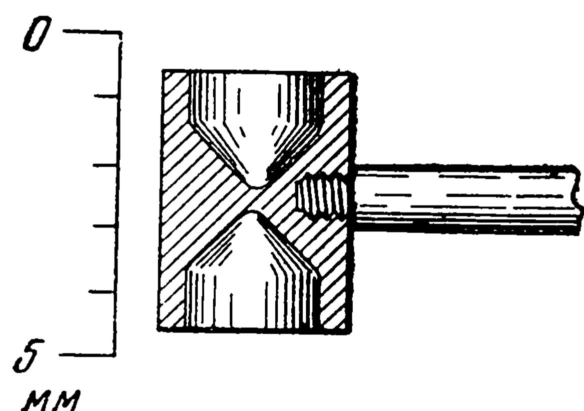


Рис. 3.

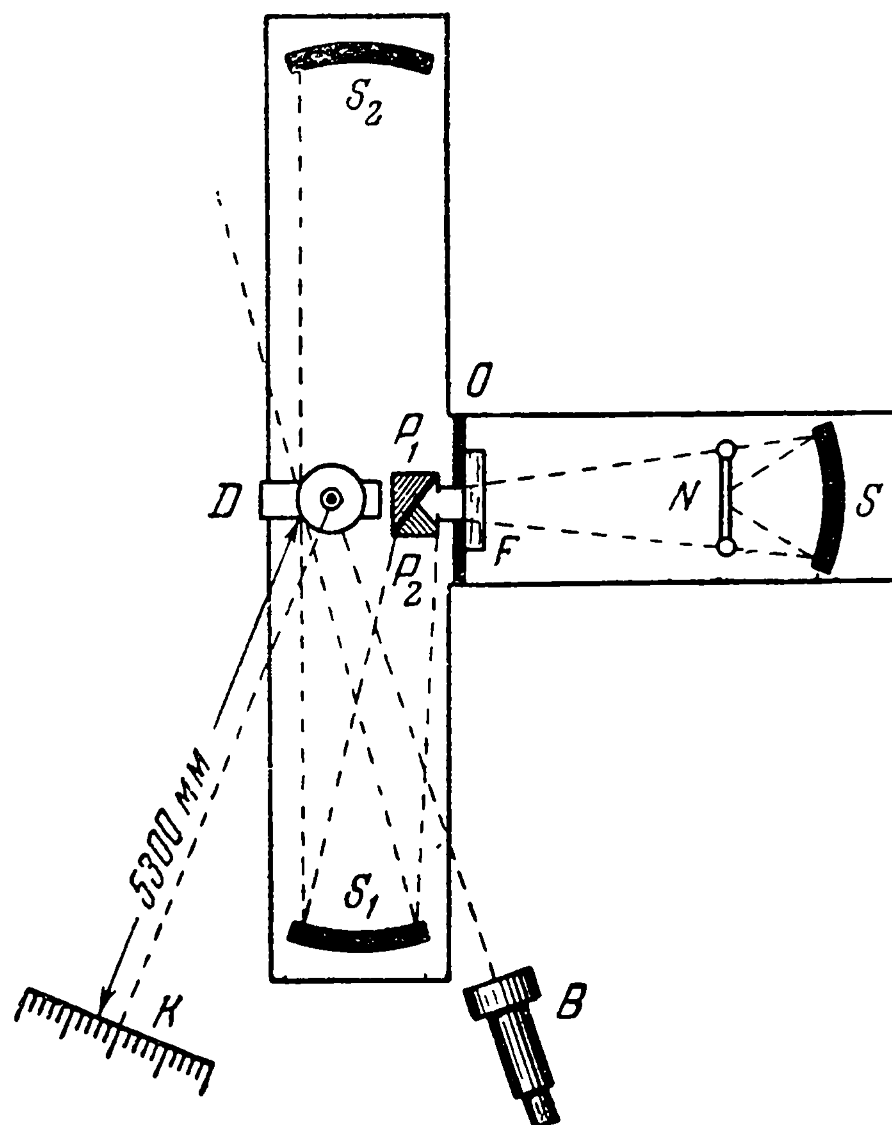


Рис. 4.

Подвижной поршень (рис. 3, в увеличенном виде) был выточен из магналия; при 4 *мм* длины и 2,85 *мм* в диаметре он весил $< 0{,}03$ *г*; в него крепко ввинчивалось алюминиевое коромысло. Поршень свободно двигался внутри цилиндрического отверстия, диаметром в 3,25 *мм*. Чтобы избежать притяжений, обусловленных эффектом Вольта, в цилиндрическое отверстие была вделана накрепко муфта из магналия. Коромысло

крутильных весов (см. рис. 1) несло на себе противовес Z и зеркало для отсчетов A; оно привешивалось на крючок H кварцевой нити. Посредством соответственного передвижения точки подвеса легко было центрировать поршень в муфте.

Через стеклянный кран W_1, вмазанный сургучом, можно было вводить в поршневой прибор воздух или испытуемый газ; кран W_2 служит для выхода. Зажим Y служит для укрепления поршневого прибора на осветительном приборе.

§ 6. Осветительный прибор (рис. 4 в плане) состоял из солидного T-образного железного постамента с установочными винтами; на нем был укреплен горизонтальный нернстовский штифт (1a) N. Он питался от аккумуляторной батареи института; его постоянство особо контролировалось включенными в цепь прецизионными вольтметром и амперметром. Посеребренное спереди вогнутое зеркало S ($r = 12$, $d = 10$ *см*) бросало увеличенное изображение штифта на прямоугольную диафрагму O (2×3 *мм*). Флуоритовая пластинка F толщиной в 8 *мм* ставилась на пути лучей и задерживала все лучи, которые в заметной степени могли быть поглощены на дальнейшем пути в окошках поршневого прибора. Из диафрагмы O лучи шли на посеребренную поверхность призмы P_1, отражались ею на вогнутое зеркало S_1 и давали действительное изображение диафрагмы в газовом пространстве поршневого прибора D и притом так, что все лучи шли по газу, не попадая на стенки прибора. Пользуясь особым, не показанным на чертеже пневматическим приспособлением, наблюдатель мог простым нажатием на резиновую грушу мягко, без сотрясения прибора, подымать столик, на котором укреплены призмы P_1 и P_2; тогда свет, вместо призмы O, попадает на P_2 и отражается зеркалом S_2 в поршневой прибор с противоположной стороны. Зеркала S_1 и S_2 были диаметром в 10 *см* с радиусом кривизны 40 *см*. Оправы, служащие для тонкой установки зеркал S, S_1 и S_2 и призм, не показаны на чертеже.

Через трубу B и плоское зеркальце поршневого прибора наблюдалась шкала K, находившаяся в 5,3 *м*.

§ 7. Шкала должна освещаться очень сильно, чтобы глаз без утомления переносил долгие ряды наблюдений; на стеклянной линейке был осажден непрозрачный слой платины, а в последнем нарезаны миллиметровые деления M (рис. 5). Последние освещались сзади нернстовским штифтом N с помощью конденсора C. Конденсор давал сильно увеличенное изображение штифта на зеркальце A поршневого аппарата. При таких условиях освещение было настолько ярко, что его приходилось в должной мере ослаблять пластинкой зеленой желатины. Плоское зеркальце ($d = 5$ *мм*) было настолько совершенно, что замечавшееся уширение отдельных делений зависело исключительно от дифракционных явлений; отсчеты можно было без затруднения и с полной уверенностью делать с точностью до $+0,1$ *мм*.

§ 8. Термоэлементы, служившие для измерения коэффициентов абсорбции газа, были сделаны из платиновых и константановых проволок, толщиной 0,2 *мм*, покрытых платиновой чернью и прикрепленных эбонитовыми рамками к поршневому прибору (на рис. 1 они не показаны). Термоэлементы были соединены, по Поггендорфу [1] [3], последовательно (рис. 6) и замкнуты постоянным сопротивлением (10 *ом*) и переменным прецизионным сопротивлением. Гальванометр D был типа д'Арсонваля.

Обозначим через α коэффициент абсорбции газа, через r — сопротивление термоэлемента T_2 и через R_e и R_g сопротивления прецизионного реостата P, когда прибор наполнен воздухом и испытуемым газом (при отклонении гальванометра 0); тогда

$$\alpha = \frac{R_e - R_g}{R_e + r}.$$

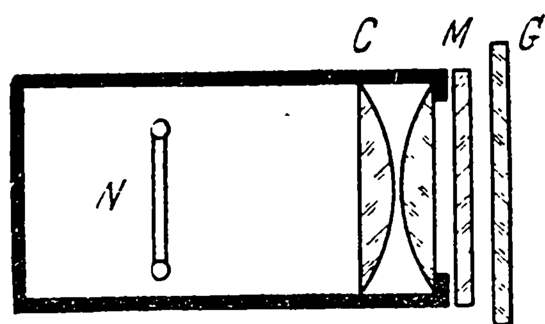


Рис. 5.

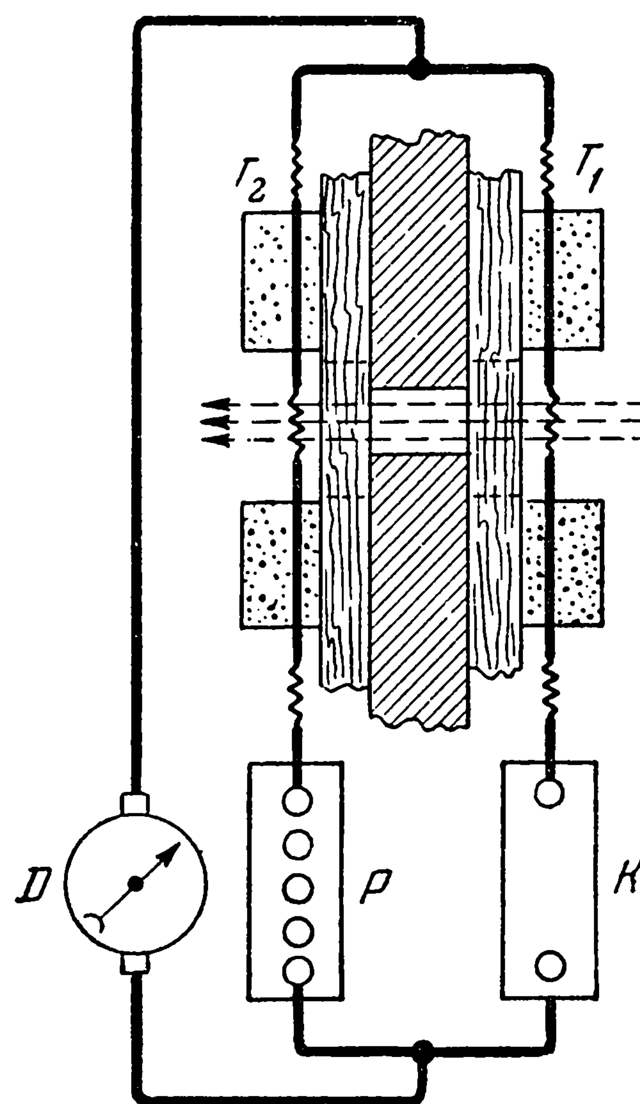


Рис. 6.

§ 9. Калориметр, служивший для измерения энергии лучей, проходивших через поршневой прибор, был построен по образцу того, который я применял в своих более ранних исследованиях о силах светового давления [2].

При этом водяная защита была заменена массивной медной оболочкой H (вес 1600 *г*) (рис. 7); пары эфира, служившего для охлаждения калориметра, откачивались насосом. Оболочка была защищена ватой и эбонитом от резких изменений температуры. Водяной эквивалент покрытого спереди платиновой чернью медного цилиндра K, термометрического шарика и налитой в цилиндр ртути достигал 6,36 *г*. Температура калориметра и оболочки определялась двумя одинаковыми термометрами

---

[1] Ср. J. B o s s c h a [2]. Pogg. Ann., 94, p. 172, 1855.
[2] P. L e b e d e w. Ann. d. Phys., 6, p. 445; 1901.

с делениями на десятые доли градуса; термометры погружались в соответственно просверленные отверстия, наполненные ртутью. Отсчеты делались с помощью двух труб. Калориметр можно было без труда устанавливать на постаменте осветительного прибора, вплотную за поршневым прибором.

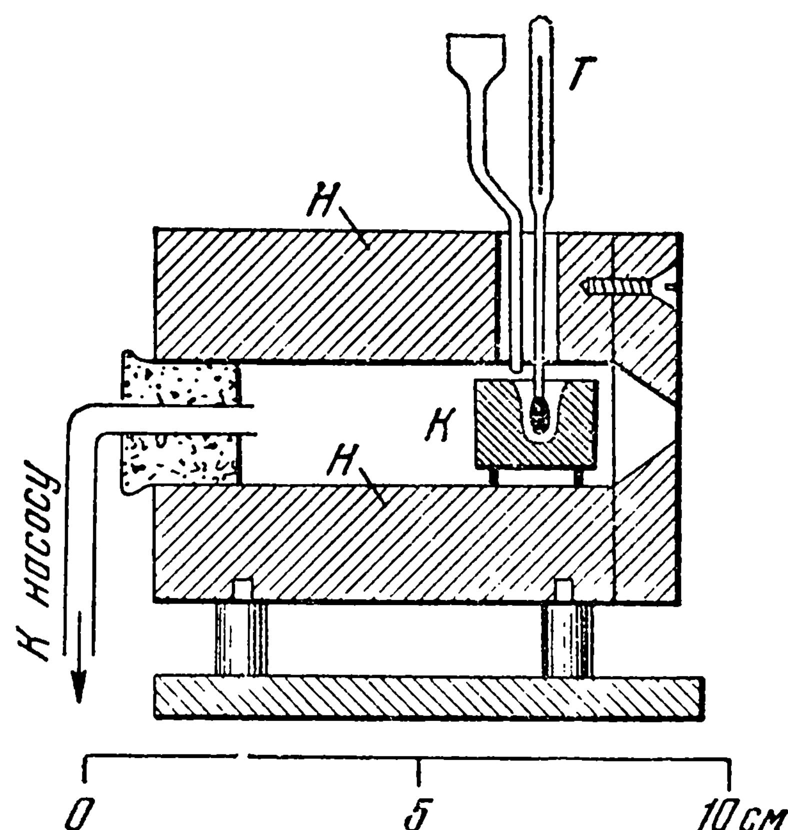


Рис. 7.

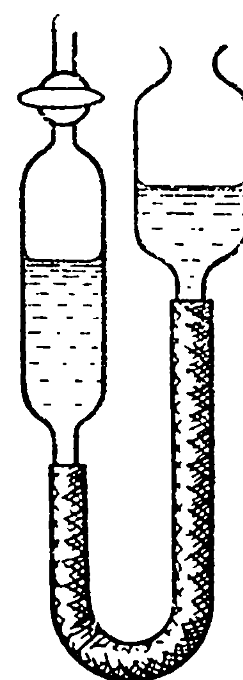


Рис. 8.

§ 10. Газы: воздух, метан, пропан, бутан, этилен и ацетилен получались из газометров, углекислота и водород — из кипповских аппаратов. Для приготовления водородных смесей служила пипетка (рис. 8) объемом в 500 *см*³; запирающей жидкостью служила вода.

III. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ОПЫТЫ

§ 11. При проведении опытов, имеющих целью обнаружить действие пондеромоторных сил света на молекулы газа, выступают на первый план те побочные силы, которые зависят от конвекции; небольшой расчет показывает, что в газовой массе, имеющей в высоту всего несколько миллиметров, уже разница в температуре на тысячные доли градуса Цельсия влечет за собой такие разницы плотностей, которые могут вызвать разницы давлений того же порядка, как и измеряемые силы давления света. Поэтому вертикальные размеры поршневого прибора (см. рис. 1) были выбраны настолько малыми, насколько это только допустимо по практическим соображениям: граница здесь достигается довольно скоро, так как при уменьшении размеров очень быстро растет трение газа, и коромысло крутильных весов даже при сравнительно очень больших направляющих силах является переапериодизированным. Наиболее благоприятные размеры прибора (см. рис. 1) были получены путем опыта, для чего при-

шлось в течение исследования построить и внимательно испробовать более 20 аппаратов разных форм и величин. Чтобы определить, насколько описанный выше прибор (см. рис. 1) позволяет измерить силы светового давления без систематических ошибок, нужно было также изучить прибор с этой стороны.

§ 12. Выбор газов для исследования. Удобными для исследования оказались углекислота (CO_2) и углеводороды: метан (CH_4), этилен (C_2H_4), ацетилен (C_2H_2) и в особенности отличающиеся своим высоким поглощением пропан (C_3H_8) и нормальный бутан (C_4H_{10}). За приготовление последних двух газов я выражаю и здесь мою признательность моему товарищу проф. Н. Д. Зелинскому. Исследование других газов пришлось отбросить, так как они или обладали очень малой поглощательной способностью, или могли химически действовать на поршневой прибор.

При долгих предварительных опытах, которые были предприняты для выработки соответственной формы поршневого прибора, применялись те газы, которые легче всего получаются: ацетилен, углекислота и светильный газ. При этом обнаружился замечательный результат, а именно: силы давления, измеренные для светильного газа, давали в различных приборах сходящиеся величины, тогда как для углекислоты и ацетилена полученные значения колебались в широких пределах между положительными и отрицательными величинами. Возникла мысль объяснить эту особенность светильного газа его сравнительно гораздо большей теплопроводностью, что обусловливается примесью водорода: при чистом газе (ацетилен, углекислота) проникающие через него лучи нагревают его очень неравномерно, так как лучи абсорбируются преимущественно в первых же слоях; так как в то же время их тепловая отдача мала, то в газе возникают вариации плотностей и связанные с ними конвекционные токи. Последние действуют на поршень поршневого прибора, и направление и величина этого действия не поддаются никакому учету. Но если подмешивать к такому газу водород (см. ниже §§ 16 и 17), то, с одной стороны, уменьшается абсолютная величина плотности, а с другой стороны, в особенности сильно уменьшается неравномерность нагревания благодаря увеличению теплопроводности. Таким образом устраняются вредные вариации в плотностях газа. Только этот прием позволил смерить силы светового давления, действующие на газ, с надлежащей уверенностью и вне зависимости от посторонних возмущений. Пришлось, следовательно, ограничиться исследованием водородных смесей названных выше газов.

§ 13. Точность измерения отклонений. Так как трение газа было довольно велико, то нужно было задать кварцевой нити не особенно маленькую направляющую силу; наиболее подходящей оказалась та сила, при которой система с поршнем двигалась апериодически, достигая окончательной установки в 30 *сек*. Благодаря сильному трению в газе наблюдаемая в трубу шкала при расстоянии 5,3 *м* представляется совершенно неподвижной; благодаря же хорошим качествам зеркала и сильному осве-

щению делений шкалы можно было без всяких затруднений, с полной уверенностью отсчитывать десятые доли делений. Медленное передвижение нулевой точки, являющееся следствием медленного изменения температуры закутанного в вату поршневого прибора, практически скорей помогает наблюдениям, так как при нем последовательные отсчеты падают каждый раз на новые места шкалы, что предохраняет от систематических ошибок при оценке на глаз десятых долей деления.

Измеренные величины отклонений лежали между 0,3 и 2,5 делений шкалы[1]. При этих исключительно малых отклонениях приходилось делать целые ряды наблюдений (31 отсчет через каждые 30 *сек*). Из прилагаемого примерного протокола наблюдений (см. ниже § 20) и из сопоставления результатов (см. ниже § 24) явствует, что среднее уклонение отдельного отсчета от средней величины лежит ниже, чем $\pm$ 0,1 деления, а вероятная ошибка целого ряда наблюдений ниже $\pm$0,05 деления шкалы. Таким образом, даже и эти маленькие отклонении измеряются с точностью по крайней мере 10%, что совершенно достаточно ввиду той точности окончательного результата, которая была поставлена целью.

§ 14. Установка приборов. Поршневой прибор привинчивался к осветительному прибору (см. рис. 4) и оба зеркала S_1 и S_2 устанавливались так, что действительное изображение диафрагмы приходилось внутри газового пространства G (см. рис. 1), не задевая стенок прибора. Для того чтобы не могли попасть на поршень лучи, отраженные вовнутрь флуоритовыми пластинками, зеркала S_1 и S_2 устанавливались таким образом, что поршень лежал на прямой, соединяющей концы их горизонтальных поперечников (см. рис. 4). При таком положении зеркал лучи, отраженные флуоритовыми пластинками, получают такое направление, что не могут попасть на поршень; оптическая ось пучка образует при этом в горизонтальной плоскости угол около 7° с осью газового пространства.

Осветительный прибор с помощью установочных винтов ставится так, что верхняя и нижняя стенки газового пространства G (см. рис. 1) в поршневом приборе стоят приблизительно горизонтально. После этого, сняв стеклянный колокол KK, до тех пор перемещают с помощью суппорта точку привеса кварцевой нити (возможно движение вверх или вниз, во все стороны по горизонтали, вращательное), покуда поршень не ходит в своем отверстии свободно и центрально. Если теперь посмотреть вдоль оси поршня на какую-нибудь освещенную поверхность, то поршень кажется окруженным светлой кольцеобразной каймой.

Когда прибор наполнен воздухом или водородом, то при изменении направления лучей не замечается никаких отклонений поршня, выходящих за пределы $\pm$ 0,05 деления шкалы. Это доказывает, что прямое действие лучей на поршень исключено.

[1] Применение света дуговой лампы позволяет увеличить эти отклонения приблизительно в 10 раз. Но при сильных колебаниях света дуги совершенно невозможны измерения абсорбции, и потому такие опыты не годятся для количественных измерений

§ 15. Наклон газового пространства в направлении пучка лучей (рис. 9) имеет следствием, что газовая масса, нагреваемая падающими лучами, стремится кверху как более легкое тело, приходит, таким образом, в движение и давит на поршень. Так как среднее нагревание газовой массы не зависит от направления падающих лучей, то проистекающие отсюда возмущения для обоих направлений лучей одинаковы как по величине, так и по направлению, и потому они могут быть исключены при измерении сил светового давления.

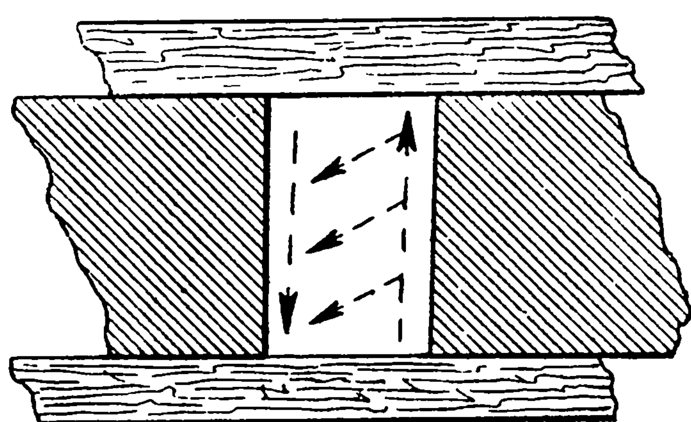


Рис. 9.

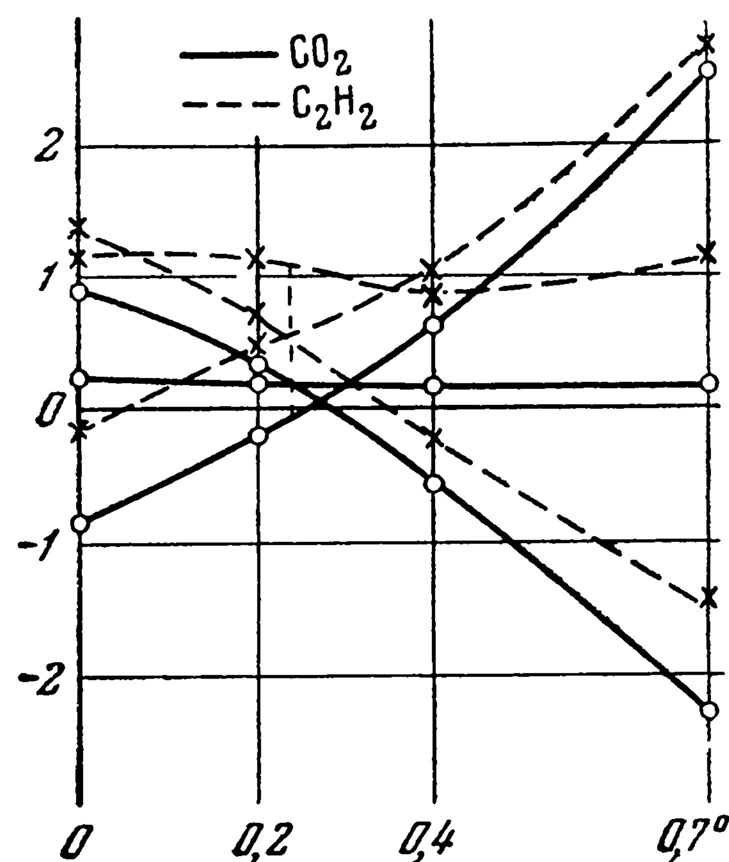


Рис. 10.

Чтобы составить себе представление о величине этих сил и об их действии, были проделаны следующие опыты: поршневой прибор наполнялся исследуемым газом или газовой смесью, а затем:

1) можно было, вводя металлический экран, преграждать путь лучам, приходящим от зеркала S (см. рис. 4), а унося экран, — пускать лучи в газовое пространство спереди;

2) посредством пневматического приспособления двойное зеркало P_1P_2 подымалось кверху, закреплялось в этом положении, и затем металлическим экраном устранялись лучи, приходившие от S_2; удаляя экран, мы пускаем свет в газовое пространство сзади;

3) поднятием и опусканием двойного зеркала (с помощью того же пневматического приспособления) можно было также попеременно пускать лучи то спереди, то сзади.

В каждом случае производилось 11 отсчетов, следовавших друг за другом через каждые 30 *сек* (в дефинитивных опытах — 31) [1], и вычислялось среднее значение отклонений, а также средняя величина отступлений отдельных результатов от среднего значения.

---

[1] О подробностях наблюдения и их подсчетов см. ниже § 20.

При данном наклоне такие предварительные опыты проделывались поочередно с CO_2 (чистой), ацетиленом (чистым), $(0,5CO_2 + 0,5H_2)$ и $(0,5C_2H_2 + 0,5H_2)$.

Опыты проводились для пяти различных наклонов; сначала нижняя стенка газового пространства устанавливалась приблизительно в горизонтальной плоскости; это положение принималось за нулевое. Проводился ряд наблюдений; после этого точка привеса кварцевой нити в поршневом приборе (см. рис. 1) немного подвигалась с помощью суппорта параллельно направлению светового пучка, а поршневой аппарат получал некоторый соответственный наклон с помощью установочных винтов осветительного прибора (см. рис. 4). Зная расстояние между этими винтами и величину их хода, можно было вычислить величину наклона. И для этого нового наклона проводился ряд наблюдений при четырех различных наполняющих прибор газах.

В табл. 1 сопоставлены полученные результаты; N означает порядковый номер ряда опытов, ψ — угол наклона. Средние значения отклонений (в делениях шкалы) приведены здесь с средними величинами уклонений от этих значений. Знак (+) означает движение газовой массы в направлении лучей, (—) же в обратном направлении.

Таблица 1

N	$\psi°$	Газ	I	II	III	
			Спереди	Сзади	Спереди	Сзади
1	0,0		—0,85±0,04	+0,95±0,07	+0,25	±0,07
13	0,2		—0,15±0,06	+0,35±0,03	+0,25	±0,04
5	0,4	CO_2 чистый	+0,65±0,05	—0,55±0,05	+0,20	±0,10
9	0,7		+2,45±0,05	—2,25±0,05	+0,15	±0,12
2	0,0		+0,30±0,05	+0,20±0,10	+0,45	±0,06
14	0,2	$0,5CO_2 + 0,5H_2$	+0,25±0,02	+0,30±0,08	+0,45	±0,08
6	0,4		+0,40±0,05	+1,10±0,05	+0,55	±0,06
10	0,7		+0,55±0,07	—0,15±0,08	+0,55	±0,05
3	00,0		—0,15±0,07	+1,30±0,03	+1,10	±0,04
15	0,2		+0,45±0,03	+0,70±0,06	+1,10	±0,08
7	0,4	C_2H_2 чистый	+1,00±0,10	+0,20±0,06	+0,90	±0,11
11	0,7		+2,60±0,16	—1,50±0,11	+1,05	±0,06
4	0,0		+0,45±0,06	+0,35±0,07	+0,75	±0,04
16	0,2	$0,5C_2H_2 + 0,5H_2$	+0,45±0,07	+0,40±0,06	+0,80	±0,07
8	0,4		+0,55±0,07	+0,30±0,80	+0,75	±0,04
12	0,7		+0,70±0,07	+0,10±0,07	+0,75	±0,10

Результаты табл. 1, относящиеся к чистым газам, представлены графически на рис. 10. Здесь за абсциссы взяты величины наклонов, за ординаты — величины отклонений в делениях шкалы.

Из чертежа ясно, во-первых, что даже при очень сильных конвекционных токах в чистых газах разницы отклонений (III), которыми измеряется величина светового давления, остаются почти постоянными; во-вторых, что в смесях с водородом отклонения очень мало зависят от изменения наклона.

Посредством установочных винтов осветительный прибор был приведен в наклон 0,2°; в этом положении он был использован для всех дальнейших измерений.

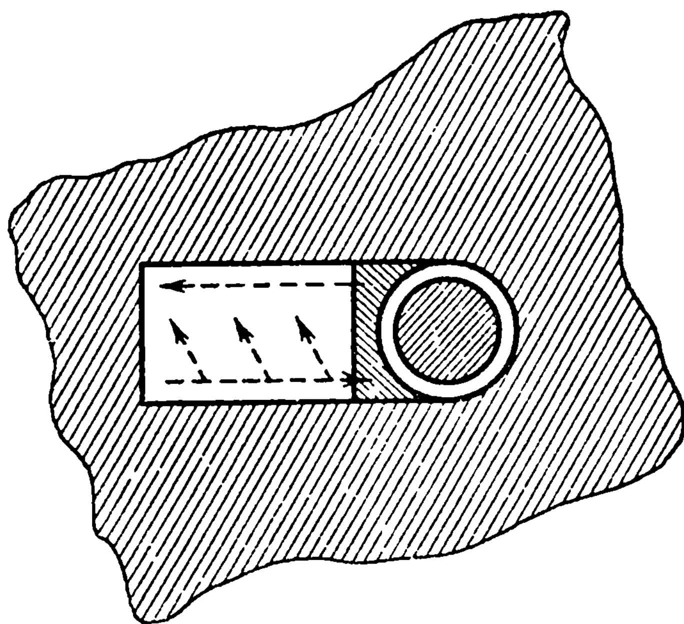


Рис. 11.

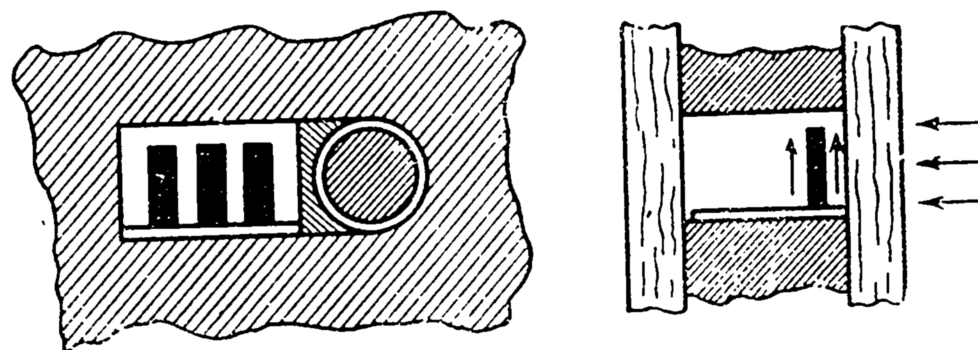


Рис. 12.

§ 16. Влияние наклона в направлении, перпендикулярном к пучку лучей, может сказываться в значительных систематических ошибках (рис. 11), так как появляющиеся при этом возмущающие силы меняют знак при изменении направления лучей на противоположное. Когда лучи падают на абсорбцирующую массу газа, то сильнее всего нагреваются ближайшие по пути лучей слои; они действуют по отношению к последующим слоям как «светофильтры» и, если газовое пространство наклонено так, как показано на рис. 11, то образуется течение более холодного газа к поршню R поршневого прибора и от этого уменьшается измеряемое отклонение. То же самое имеет место относительно лучей, падающих на газовое пространство с противоположной стороны; возмущающая сила меняет точку приложения одновременно с изменением направления лучей и опять накладывается на силы давления. Если же газовое пространство имеет противоположный наклон, то оба отклонения увеличиваются.

Чтобы исследовать влияние этих неравномерных нагреваний на отклонения поршня, прибор наполнялся воздухом; неравномерность нагревания достигалась тем, что в газовом пространстве помещалась алюминиевая решетка (рис. 12), зубцы которой были покрыты платиновой чернью. Лучи, падающие на решетку, нагревают эти зубцы, которые отдают полу-

ченную теплоту воздуху. Если решетка находилась поблизости от окошка и если газовое пространство было наклонено в направлении, перпендикулярном к пучку (как на рис. 11), то при инсоляции всегда наблюдалось отклонение поршня, менявшее знак одновременно с изменением направления наклона; измеряя эти отклонения при различных величинах наклона, можно было найти такое положение, при котором инсоляция решетки не производила никакого отклонения поршня. Это положение при изменении формы решетки и ее удаления от окошка оставалось почти постоянным (в пределах $\pm 0,5°$).

Таким образом, можно было привести поршневой прибор в такое положение, при котором измеряемые силы светового давления зависели от наклона только в очень слабой степени.

Чтобы определить влияние такого наклона на величину измеряемых сил светового давления, прибор с помощью алюминиевой решетки устанавливался приблизительно правильно и наполнялся исследуемым газом; 11 наблюдений, следовавших друг за другом через 30 *сек*, при освещении попеременно спереди и сзади давали пять отдельных значений отклонения поршня; отсюда вычислялась средняя величина отклонения и среднее значение уклонений от этой средней величины. Полный ряд наблюдений охватывал измерения с чистой CO_2, чистым C_2H_2, со смесями $(0,5CO_2 + 0,5H_2)$ и $(0,5C_2H_2 + 0,5H_2)$.

После этого точка привеса кварцевой нити (см. рис. 1) с помощью суппорта немного сдвигалась в направлении, перпендикулярном к пучку лучей, осветительный прибор (см. рис. 4) соответственно наклонялся с помощью установочных винтов, и снова производился такой же ряд наблюдений.

В табл. 2 собраны полученные результаты: N — порядковый номер ряда опытов, ψ — угол наклона, α — коэффициент абсорбции (см. ниже табл. 4) газа, наполнявшего прибор. Знак (+) соответствует движению газа в направлении распространения лучей, знак (—) движению в противоположную сторону.

Таблица 2

N	$\varphi°$	CO_2 чист	$0,5CO_2 + 0,5H_2$	C_2H_2 чист.	$0,5C_2H_2 + 0,5H_2$
I	0,0	$+2,85\pm0,14$	$+0,60\pm0,08$	$+2,35\pm0,10$	$+0,90\pm0,02$
II	0,4	$+0,95\pm0,05$	$+0,50\pm0,08$	$+1,40\pm0,06$	$+0,80\pm0,12$
III	0,6	$+0,25\pm0,04$	$+0,45\pm0,08$	$+1,10\pm0,08$	$+0,80\pm0,17$
IV	1,3	$-0,75\pm0,07$	$+0,40\pm0,08$	$+0,30\pm0,07$	$+0,65\pm0,08$
α		0,0080	0,0055	0,0111	0,0080

Результаты табл. 2 представлены графически на рис. 13 Из него ясно, что при измерениях сил светового давления в водородных смесях небольшой наклон прибора в направлении, перпендикулярном к пучку лучей, влияет на результат сравнительно очень слабо; в этом случае установка с помощью алюминиевой решетки является совершенно достаточной. Совсем не так дело обстоит в случае чистых газов. Поэтому в дальнейшем пришлось отказаться от измерения сил давления света в чистых газах.

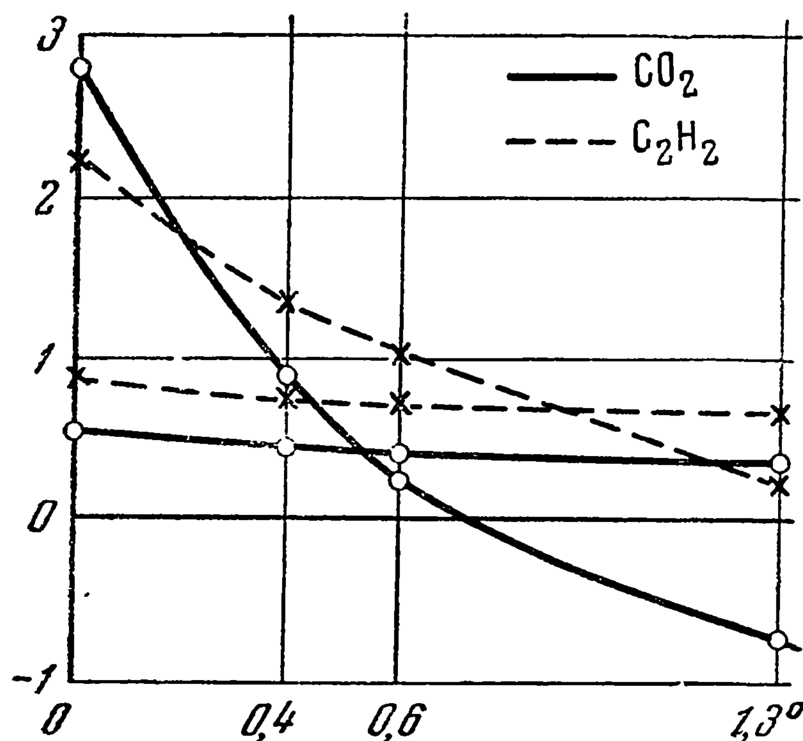


Рис. 13.

§ 17. Зато опыты с чистыми газами при различных наклонах прибора с полным удобством могут служить для того, чтобы облегчить установку прибора и избежать чрезвычайно долгих наблюдений с алюминиевыми решетками. Для этого надо воспользоваться предложением Фитцджеральда (доказываемым ниже), что силы давления прямо пропорциональны коэффициентам поглощения, и установить прибор так, чтобы его отклонения сделались приблизительно пропорциональными коэффициентами поглощения чистых газов. При такой установке и даже при значительно от нее отличающемся положении измерения сил светового давления в водородных смесях делаются совершенно свободными от систематических ошибок. Таким именно способом прибор был установлен и постоянно применялся при $\psi = 0{,}4°$.

IV. ИЗМЕРЕНИЯ

§ 18. Ряд наблюдений состоял из определения коэффициента поглощения, ряда определений давления, второго определения коэффициента поглощения и следующего за ним калориметрического измерения энергии падающих лучей.

§ 19. Измерения абсорбции начинались после того, как через поршневой прибор в продолжении десяти минут протягивался воздух из большого газометра. В течение этих же десяти минут приготовлялась для исследования газовая смесь. Для этой цели в газовую пипетку (см. рис. 8) вводилось 250 *см*^{3} водорода из кипповского аппарата, а затем туда же нагонялся газ из соответствующего газометра, покуда общий объем не достигал 550 *см*^{3}. Энергичным встряхиванием пипетки (причем вода в ней подбрасывалась на большую высоту) достигалось перемешивание введенных газов.

Так как сопротивление P (см. рис. 6) может изменяться только скачками по $+0{,}1$ *ом*, то наблюдались отклонения гальванометра при двух сопро-

тивлениях P_1 и $P_1 + 0{,}1$ *ом*, при которых эти отклонения были направлены в противоположные стороны; отсюда вычислялась величина компенсирующего сопротивления P_0, введение которого влечет за собой спокойствие гальванометра при освещении термоэлементов.

Такие определения проделывались при наполнении прибора сначала воздухом, а потом исследуемым газом; отсюда вычислялся коэффициент поглощения.

По окончании измерений давления снова определялась величина компенсирующего сопротивления при наполнении прибора сначала испытуемым газом, а потом воздухом, и снова вычислялась величина коэффициента поглощения.

Такое двукратное определение коэффициента поглощения является совершенно необходимым, потому что термоэлементы T_1 и T_2 (см. рис. 6) лежат в различных местах светового пучка и, значит, освещаются лучами, вышедшими из различных мест нернстовского штифта; в связи с этим обстоятельством при высокой чувствительности измерения достаточно совершенно незначительной деформации поверхности штифта (такое изменение легко может произойти за время измерений, около 15 *мин*), чтобы обусловить значительное изменение величины компенсирующего сопротивления и неправильность в определении коэффициента поглощения. При двукратном измерении мы имеем взаимный контроль результатов; опыт показывает, что расхождение их в общем отступает от средней величины не более чем на 10%.

Чтобы избежать образования влажной пленки на флуоритовых окошках F_1 и F_2 поршневого прибора, что помешало бы определению поглощения, воздух и газовые смеси перед введением в поршневой прибор пропускались пузырьками через водный раствор $ZnCl_2$, где и задерживался излишек водяных паров.

Таблица 3

Отсчитано		Вычислено		Отсчитано		Вычислено	
Направление пучка		Отклонение в делениях шкалы	Отступление	Направление пучка		Отклонение в делениях шкалы	Отступление
Спереди	Сзади			Спереди	Сзади		
5,0	5,5	0,50	0,05	6,0	6,6	0,60	0,05
5,0	5,6	0,50	0,05	6,0	6,6	0,55	0,00
5,2	5,9	0,60	0,05	6,1	6,7	0,60	0,05
5,4	6,0	0,60	0,05	6,1	6,8	0,65	0,10
5,4	6,1	0,60	0,05	6,2	7,0	0,65	0,10
5,6	6,2	0,50	0,05	6,5	7,0	0,45	0,10
5,8	6,3	0,45	0,10	6,6	7,2	0,55	0,00
5,9	6,6	0,65	0,10	6,7			

Средняя величина отклонения $0{,}55 \pm 0{,}06$.

§ 20. Для измерения сил давления через каждые полминуты отсчитывалось положение поршня, затем тотчас же с помощью пневматического приспособления изменялось направление лучей; через 30 *сек* следовал новый отсчет и новое изменение направления пучка и т. д. Чтобы иллюстрировать ход такого ряда, может служить табл. 3, дающая протокол одного ряда наблюдений (№ 8 для $0{,}5CO_2 + 0{,}5H_2$).

Чтобы предохранить отсчеты положения поршня от случайных колебаний, поршневой прибор был закутан ватой и снабжен металлической защитой; от излучения печей и тела наблюдателя он был закрыт большими металлическими экранами; ход его нулевой точки всегда был меньше чем $\pm$ 0,2 деления шкалы в минуту.

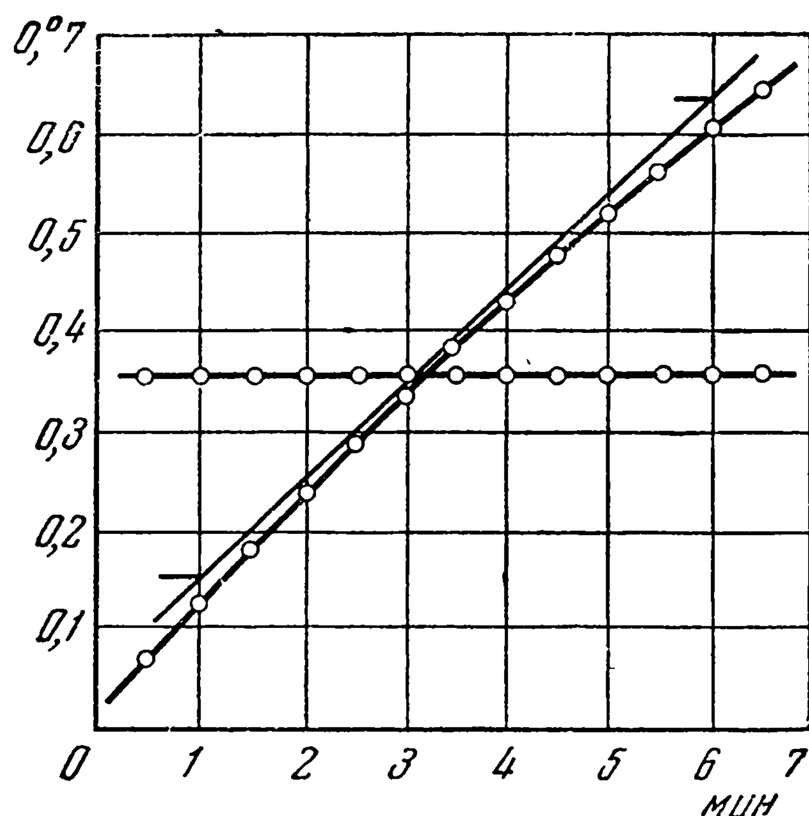


Рис. 14.

§ 21. Энергия пучка измерялась калориметром (см. рис. 7), который помещался сзади поршневого прибора и подвергался предварительному охлаждению с помощью нескольких капель этилового эфира; подъем его температуры, а также и изменение температуры медной защиты наблюдались приблизительно в течение 10 *мин* через каждые 30 *сек*. Отсчеты наносились на координатную бумагу, связывались непрерывными кривыми; в точке пересечения двух кривых строилась касательная к кривой калориметра (рис. 14). Отсюда высчитывался подъем температуры калориметра за 5 *мин* (от 0,40 до 0,65° С); вычисленная величина поправлялась на повышение температуры медной защиты (около 0,05°), так что

$$T_0 = T_1 - t.$$

Повышение можно было определить с точностью до $\pm$ 0,02° С, т. е. до $\pm$5%.

Достаточным оказывалось одно определение в конце ряда наблюдений, так как отдача энергии нернстовским штифтом в течение ряда колебалась только в пределах +2%.

V. ВЫЧИСЛЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ ВЕЛИЧИН

§ 22. Абсолютная величина измеренных сил давления вычислялась из направляющей силы кварцевой нити и размеров поршневого прибора.

Направляющая сила определялась так же, как в моих прежних опытах; для этой цели крючок на конце нити нагружался мед-

ным цилиндром длиной в 1,20 *см* и весом в 0,020 *г*, а затем определялось время качания как при этой нагрузке $\left(\frac{T}{2} = 4{,}3\ \textit{сек}\right)$, так и одного крючка без нагрузки $\left(\frac{T}{2} = 1{,}9\ \textit{сек}\right)$. Направляющая сила нити D оказалась

$$D = 0{,}0016\ \textit{дин}\cdot\textit{см}.$$

Расстояние h центра поршня от оси кручения, измерявшееся по методу, данному мной ранее (см. выше стр. 202), было равно 0,80 *см*. Сила, которая должна быть приложена к поршню, чтобы произвести отклонение в одно деление шкалы при расстоянии шкалы в 5300 *мм*, равняется $1{,}9\cdot10^{-7}$ *дины*.

Поршень имел диаметр в 0,285 *см*, а отверстие, в котором он ходил,— 0,325 *см*. Если с одной стороны поршня устанавливается избыток давления, то к давлению, действующему на переднюю поверхность, нужно еще прибавить те силы, которые возникают благодаря токам газа, образующимся в просвете между поршнем и стенками отверстия и имеющим стремление увлекать за собой и поршень. Простые соображения приводят к заключению, что общая сила, действующая на поршень, такова, как если бы диаметр поршня увеличился на половину просвета. Отсюда вычисляется величина давления, соответствующего отклонению на одно деление шкалы, а именно

$$2{,}6\cdot10^{-6}\ \textit{дин}/\textit{см}^2.$$

При этих измерениях необходимо еще принять во внимание, что избыток давления в газе несколько больше, чем обнаруженное давление на поршень, так как газ непрерывно проникает через просвет, должен вновь подтекать через газовое пространство к поршню, и при этом благодаря трению в обоих каналах давление его несколько падает. Чтобы определить обусловленную этим обстоятельством поправку, были проведены опыты с трением на моделях: вода, капая из пипетки P (рис. 15), протягивала воздух между цилиндром и стенками, и соответственное изменение давления отсчитывалось на уровне Теплера [1] [1]. Эти опыты были проделаны также с прибором, изображенным на рис. 16, это модель канала между газовым пространством и поршнем. В двух рядах опытов произведение разности давлений и времени, в течение которого просасывался определенный объем воздуха, оставалось постоянным; отношение этих произведений для обоих приборов было очень близко к 25 : 1; откуда следует, что потеря давления в каждом канале составляет около 0,04; поэтому давление, соответствующее отклонению на одно деление шкалы, составляет $2{,}8\cdot10^{-6}$ *дин*/*см*^{2}.

---

[1] A. T o e p l e r. Wied. Ann., **56**, p. 611, 1895.

В окончательных измерениях постоянно наблюдалось двойное отклонение P, которое соответствует разности давлений при изменении направления светового пучка. Давление P_m, которое соответствует одному определенному направлению пучка, составит поэтому

$$P_m = 1{,}4 \cdot 10^{-6}\ \beta\ \textit{дин/см}^2.$$

Если принять в расчет ошибки отдельных измерений, которые положены в основу при определении этой постоянной, то можно принять, что она определена правильно в пределах $\pm 5\%$.

§ 23. Вычисление абсолютных величин давления по Фитцджеральду из величин энергии пучка и коэффициента поглощения встречает значительные затруднения, зависящие от геометрических условий; чтобы вычислить эти величины хотя бы только в первом приближении, но с достаточной степенью наглядности, приходится делать некоторые упрощающие предположения.

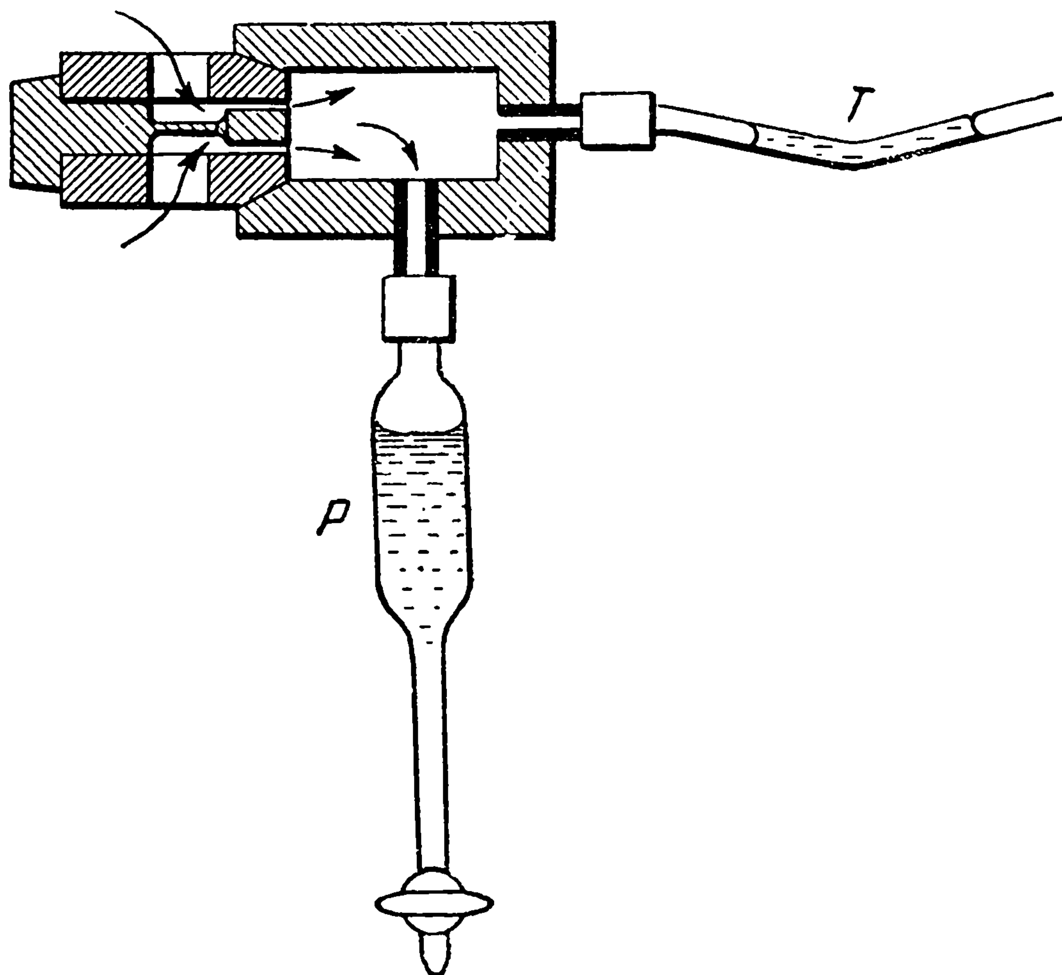


Рис. 15.

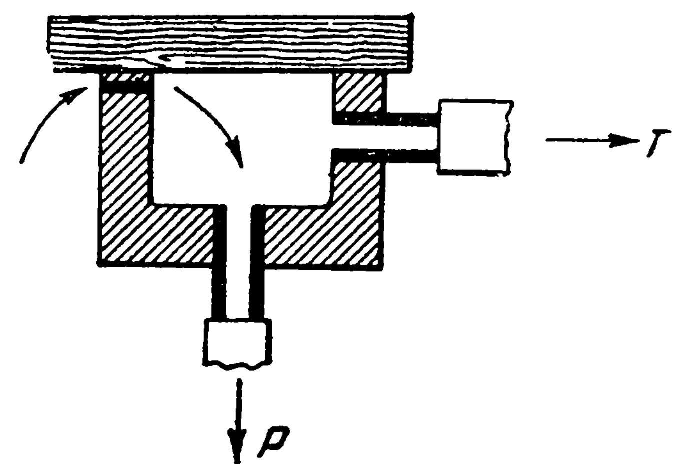


Рис. 16.

а. Простой приближенный расчет показывает, что мы увеличим вычисленную величину всего на 3%, если мы оставим без внимания то обстоятельство, что исследуемый пучок лучей является сходящимся, и проведем подсчет так, как если бы лучи были параллельны.

б. Самая значительная ошибка в вычислении сопряжена с тем, что разные места газа (рис. 17) освещаются различно и внутри газа образуются токи, отчасти сглаживающие величину максимальных давлений. При существующих здесь необычайно сложных условиях едва ли возможно вычислить результирующие силы, давящие на поршень, и приходится

опять-таки, чтобы вычислить силу давления в первом приближении, принимать, что на всю площадь газа (0,30 *см* $\times$ 0,41 *см* = 0,123 *см*^{2}) действует параллельный пучок лучей одинаковой всюду яркости, и допускать, что вычисленная в таких упрощающих условиях сила, действительно в среднем измеряется поршнем. Чтобы составить себе представление о том, насколько допустим указанный упрощенный подсчет, я пробовал точнее выяснить размеры возможных здесь максимальных и минимальных сил.

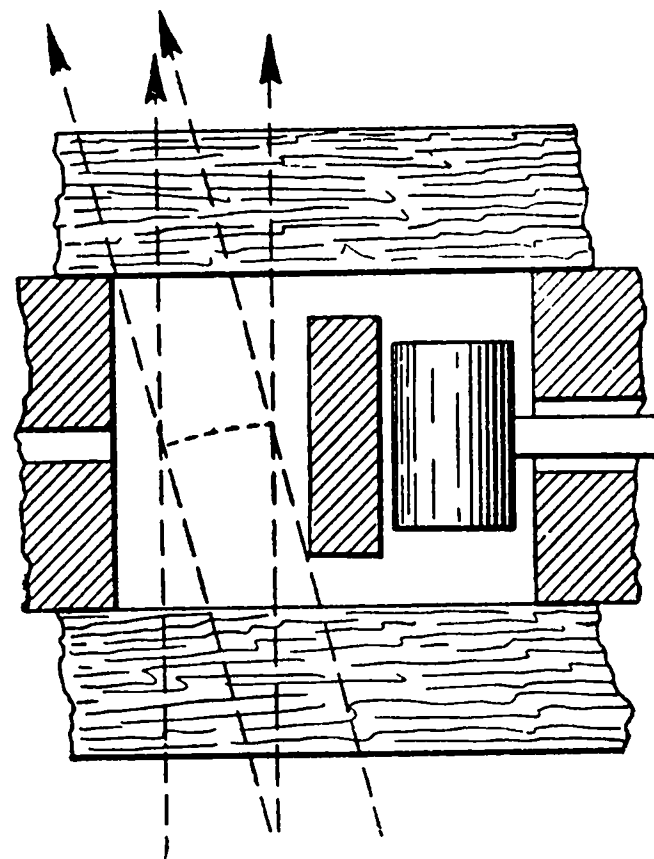


Рис. 17.

Не приводя здесь подробностей этих длинных вычислений, я укажу, что окончательный результат упрощенного подсчета не может отличаться от истины более чем на 30%.

в. Измеренная калориметром световая энергия пучка несколько меньше энергии, действительно падающей на газовое пространство, так как заметная часть последней отражается задним флуоритовым окошком. Если принять среднюю величину показателя преломления флуорита в 1,42, то отношение падающей энергии к измеренной будет 1,06 : 1. Если известны повышение температуры за 5 *мин* (300 *сек*) и водяной эквивалент калориметра ($W = 6{,}36$ *г*), то количество энергии E_0 падающей в 1 *сек* на 1 *см*^{2} газа:

$$E_0 = \frac{1{,}06 \cdot 6{,}36 \cdot 4{,}18 \cdot 10^7}{300 \cdot 0{,}123} T_0 \frac{\text{эрг}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2} = 7{,}6 \cdot 10^6 T_0 \frac{\text{эрг}}{\text{сек} \cdot \text{см}^2}.$$

г. Отраженные у заднего окошка лучи (около 6%) давят на газ с силой, направленной в обратную сторону в сравнении с измеряемой; но так как отраженные лучи заполняют лишь незначительную часть всей площади, занимаемой газом, то это обратное давление мало и им можно пренебречь.

д. Из измеренного коэффициента абсорбции и измеренного повышения температуры T_0 калориметра вычисляется по Фитцджеральду с указанными упрощениями *а*, *б* и *г* абсолютная величина P_b силы давления на единицу площади (скорость света принята равной $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*)

$$P_b = \frac{\alpha E_0}{V} = \frac{7{,}6 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^{10}} \alpha T_0 = 2{,}5 \cdot 10^{-4} \alpha T_0 \text{ дин/см}^2$$

с систематическими уклонениями, которые не превышают $\pm 30\%$.

Таблица 4

N		β	α	T_0	P_m	P_c	$P_m : P_c$
3	0,5 метана + 0,5 H_2	0,65±0,05	0,0065±3	0,48	0,91	0,76	1,20
6	0,5 » + 0,5 »	0,60±0,05	0,0057±0	0,46	0,84	0,66	1,27
20	0,5 » + 0,5 »	0,60±0,05	0,0071±1	0,55	0,98	0,98	1,00
1	0,5 пропана + 0,5 H_2	2,05±0,09	0,0200±25	0,42	2,86	2,10	1,36
2	0,5 » + 0,5 »	1,75±0,08	0,0175±25	0,43	2,45	1,89	1,30
11	0,5 бутана + 0,5 H_2	2,10±0,07	0,0179±20	0,48	2,95	2,15	1,37
12	0,5 » + 0,5 »	2,00±0,05	0,0172±10	0,48	2,80	2,06	1,35
13	0,5 » + 0,5 »	3,10±0,05	0,0189±19	0,64	4,34	3,03	1,42
15	0,5 бутана + 0,9 H_2	0,55±0,08	0,0063±4	0,55	0,77	0,87	0,88
17	0,5 » + 0,9 »	0,70±0,05	0,0072±3	0,54	0,98	0,97	1,01
19	0,5 » + 0,9 »	0,65±0,05	0,0067±1	0,55	0,91	0,93	0,98
4	0,5 этилена + 0,5 H_2	0,60±0,05	0,0068±1	0,43	0,84	0,73	1,14
9	0,5 » + 0,5 »	0,75±0,05	0,0075±4	0,50	1,05	0,94	1,12
16	0,5 » + 0,5 »	0,80±0,05	0,0075±5	0,55	1,12	1,04	1,08
5	0,5 ацетилена + 0,5 H_2	0,85±0,05	0,0080±1	0,50	1,19	1,00	1,19
10	0,5 » + 0,5 »	0,85±0,05	0,0068±2	0,49	1,19	0,83	1,43
18	0,5 » + 0,5 »	0,70±0,07	0,0063±3	0,53	0,98	0,77	1,27
7	0,5 углекислоты + 0,5 H_2	0,55±0,05	0,0055±10	0,50	0,77	0,69	1,11
8	0,5 » + 0,5 »	0,55±0,06	0,0061±0	0,48	0,77	0,73	1,05
14	0,5 » + 0,5 »	0,70±0,05	0,0072±3	0,51	0,98	0,92	1,06

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ

§ 24. В табл. 4 приведены результаты окончательных измерений: N обозначает номер серии наблюдений в хронологическом порядке, β — измеренное отклонение крутильных весов поршневого аппарата, выраженное в делениях шкалы, α — измеренный коэффициент поглощения газа, T_0 — измеренное повышение температуры калориметра в течение пяти минут, из которого вычислялась величина энергии светового пучка E, проходящей через исследуемую газовую смесь в 1 *сек.*

P_m обозначает абсолютную величину давления света на газ, измеренную поршневым прибором и выраженную в миллионных долях дины на квадратный сантиметр; она вычислена из отклонения β, направляющей силы кварцевой нити, размеров поршневого аппарата и расстояния шкалы от прибора.

P_c обозначает величину давления света на газы, вычисленную согласно соотношению, указанному Фитцджеральдом, из величины α и E и выраженную также в миллионных долях дины на квадратный сантиметр.

Согласно предположению отношение $P_m : P_c$ должно бы быть постоянным и не отличаться существенно от единицы.

В таблице приведены 20 серий наблюдений, проведенных с 4 разными стержнями Нернста, как источниками света: этим объясняются колебания в яркости света (измеряемой T_0) и в коэффициентах поглощения α для одинаковых смесей газов.

Из таблицы следует, что для каждой газовой смеси отдельные серии наблюдений в среднем сходятся в пределах десяти процентов, соответственно неизбежным ошибкам трех непосредственно измеряемых величин.

Для различных газовых смесей, коэффициенты абсорбции которых относятся друг к другу, как 1 : 3 (метан и бутан), а плотности, как 1 : 4 (бутан), отношения $P_m : P_c$ отличаются друг от друга на величины, большие, чем величины возможных ошибок наблюдений, и указывают на небольшие систематические ошибки, которые вызваны неизбежными неточностями в установке поршневого прибора.

§ 25. Полученные результаты мы можем формулировать следующим образом:

1) существование давления света на газы установлено опытным путем;

2) величины этого давления прямо пропорциональны энергии пучка света и коэффициенту поглощения газа;

3) в пределах ошибок наблюдений и вычислений соотношение, указанное Фитцджеральдом, количественно удовлетворяет наблюдениям.

Таким образом, гипотеза о давлении света на газы, триста лет тому назад высказанная Кеплером, получила в настоящее время как теоретическое, так и экспериментальное обоснование.

Физический институт Университета.
Москва. Февраль 1910.

37. АБСОЛЮТНАЯ ВЕЛИЧИНА ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА НА ЗЕМНУЮ АТМОСФЕРУ

(*возражение Г. В. Вульфу*)

В своих рассуждениях о влиянии давления солнечного света на давление земной атмосферы Г. В. Вульф [1] [1] исходит из предположения, что это световое давление обусловливает заметные изменения в воздушном давлении.

Абсолютную величину той разницы давлений p (т. е. величину силы на 1 *см*^{2} сечения), которую вызывает пучок параллельных лучей, пронизывающий слой газа, можно вычислить из соотношения, указанного Фитцджеральдом [2] и проверенного мною[2] экспериментально

$$p = \frac{\alpha E}{v},$$

где α — коэффициент абсорбции слоя газа для лучистой энергии,
E — количество этой энергии, падающей на слой газа в 1 *см*^{2} сечения за 1 *сек*,
v — скорость света.

Если предположить, что $\alpha = {}^1/_3$, а солнечная постоянная равна 3 *кал/мин·см*^{2}, то получаем

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{3 \cdot 4 \cdot 18 \cdot 10^7}{60 \cdot 3 \cdot 10^{10}} = 0{,}000\,023 \ \text{дин/см}^2.$$

Это давление солнечных лучей так мало, что оно, очевидно, никакого уловимого влияния на распределение давления в земной атмосфере оказывать не может.

Москва. Август 1910.

---

[1] Г. В. Вульф. ЖРФО, 42, р. 181, 1910.
[2] П. Н. Лебедев. ЖРФО, 42, р. 152, 1910.

38. МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЛ

Первое сообщение

§ 1. Открытие Гэля[1] [1], что вихревое движение фотосферы вокруг солнечных пятен порождает сильные магнитные поля (вызывающие в линиях Фраунгофера явление Зеемана [2]), указывает на замечательное соотношение магнитных явлений на поверхности Солнца и магнитных свойств Земного шара: знак нормальной магнитной поляризации Земли находится в таком же отношении к направлению ее вращения, как и знак магнитной поляризации солнечных пятен к направлению вихревого движения фотосферы вокруг пятна, и этот знак соответствует движению свободных отрицательных электрических зарядов вместе с вращающимся веществом.

Сходство этих двух явлений, которое по недостатку необходимых данных мы, к сожалению, не можем проследить более подробно, — это сходство заставляет предполагать, что и физические причины, обусловливающие появление магнитных полей, и в том и в другом случае одинаковы. Свести эти магнитные силы к уже известным электромагнитным явлениям можно, только прибегая к добавочным, экспериментально не обоснованным гипотезам, а поэтому я в последующем задался целью воспроизвести в лаборатории это космическое явление и непосредственно магнитометрически исследовать магнитные явления, вызываемые вращением тел.

§ 2. При проведении указанных опытов приходится считаться с очень большою трудностью, которая обусловлена тем, что по сравнению с космическими условиями мы при лабораторных опытах можем пользоваться только ничтожно малыми массами, малыми линейными скоростями и лишь низкими температурами; поэтому остается открытым вопрос, будут ли при этих условиях магнитные силы, вызываемые вращением тел,

[1] C. E. H a l e. Astrophys. Journ., 28, p. 317, 1908.

достаточно велики, чтобы существование их можно было обнаружить магнитометрически.

Чтобы получить представление о порядке величины тех магнитных сил, которые можно ожидать при лабораторных опытах, приходится делать определенные гипотезы относительно возникания магнитного поля при вращении тела и, исходя из абсолютных величин, относящихся к земному шару, определять величину тех магнитных сил, которые можно ожидать при заданных условиях опыта; исследование сводится, таким образом, к проверке тех гипотез, которые были сделаны для объяснения явлений нормального геомагнетизма и которые при лабораторных условиях позволяют рассчитывать на появление заметных магнитных сил.

§ 3. Опыты, описанные ниже, предназначались для проверки гипотезы Сузерлэнда [1] [3], которая объясняет магнитное действие вращающейся материи тем, что в каждом нейтральном атоме центры тяжестей его разноименных зарядов не совпадают и так сдвинуты друг относительно друга, что центры отрицательных зарядов описывают большие пути, чем центры положительных; таким образом, возникающее магнитное поле является результатом разности конвекционных действий отрицательных и положительных зарядов вращающейся материи.

Как на физическую причину, обусловливающую взаимное смещение зарядов в атомах, Сузерлэнд указал на гравитационные силы, и, не входя в рассмотрение механизма явления, он выдвинул гипотезу, что атомы гравитирующей массы представляют собой электрические диполи, моменты которых совпадают с направлением силы тяжести.

В отличие от этой гипотезы Сузерлэнда, с одинаковым успехом можно принять другое предположение, а именно: что взаимное сдвижение зарядов в атомах происходит не под влиянием гравитационных сил, а под влиянием центробежных ускорений, возникающих в вращающейся массе, — и выдвинуть гипотезу, что отрицательные заряды атома смещаются в направлении, перпендикулярном к оси вращения.

Каждая из этих гипотез приводит, как показывают изложенные ниже рассуждения, к заключению, что, пользуясь массами и скоростями, с которыми еще удобно оперировать в лаборатории, мы должны ожидать в наших опытах возбуждения легко измеряемых магнитных сил, если предположим, что исследуемые тела (латунь, эбонит, вода) возбуждают при вращении магнитные силы приблизительно в той степени, в которой их вызывает и вещество земного шара; так как обе гипотезы касаются только свойств отдельных атомов и не связаны с вопросом о температуре вращающегося тела, то и проверочные лабораторные опыты можно проводить при комнатной температуре.

---

[1] W. Sutherland. Terrestr. Magn. and Atm. Electr., 8, p. 49, 1903; 9, p. 167, 1904.

Чтобы убедиться, достаточна ли чувствительность магнитометра для обнаружения ожидаемых магнитных сил вращающихся тел, равные по величине магнитные поля возбуждались гальваническими токами определенной силы, протекавшими по проволокам особым образом намотанных катушек, которые представляли собою в магнитном отношении модели вращающихся тел; во всех случаях чувствительность магнитометра была достаточна.

I. ПРИБОРЫ

§ 4. Схема расположения опытов изображена на рис. 1; при помощи колесика K фрикционного диска F, который насажен на томпаковую ось Q и приводится во вращение электродвигателем, быстрое вращательное движение (30 000—35 000 *об/мин*) сообщается K вертикальной гибкой бронзовой оси AA, на средней части которой укреплена обойма, несущая кольцо RR из испытуемого вещества; на верхней части оси нарезан винт, захватывающий зубчатое колесо счетчика оборотов [1].

Опыты проводились таким образом, что первоначально исследовалось действие ненагруженной оси AA на магнитометр M, а потом действие ее при вращении вместе с кольцом RR; разность этих двух действий должна соответствовать действию кольца.

Чтобы испытывать чувствительность магнитометра M, симметрично к вращающемуся кольцу помещалась проволочная модель S последнего, которая в зависимости от проверяемой гипотезы имела различные обмотки (§ 8 и 12).

Размеры кольца RR были следующие: наружный диаметр 6 *см*; внутренний диаметр 2 *см*; высота 2 *см*. Кольцо из изолятора (эбонита) было выточено из одного куска; кольца из проводников (латунь, алюминий) были составлены каждое из десяти тонких (в 2 *мм*) кружков, изолированных друг от друга прокладками из папиросной бумаги; жидкости (вода, бензол) наливались в пустотелый бронзовый сосуд, полость которого соответствовала указанным выше размерам кольца и была разделена восемью радиально расположенными стенками на отдельные камеры для того, чтобы при вращении сосуда избежать отставания жидкости.

Станина с вращающейся осью была укреплена на каменной колонне. Перпендикулярно к магнитному меридиану с двух сторон колонны были расположены две проволочные обмотки (диаметр 180 *см*), которые

---

[1] Не входя здесь в детальное описание прибора, замечу только, что весь прибор был построен из бронзы; из стали были сделаны только короткие тонкостенные вкладыши для шеек осей; смазочное масло подводилось к ним под давлением в достаточном количестве. Шейки вертикальной оси, несмотря на тщательную установку, снашивались довольно быстро — каждая ось выдерживала от 5 до 10 миллионов оборотов. Наиболее пригодным материалом для колесика счетчика оказалась слоновая кость.

служили для того, чтобы, пропуская через них электрические токи, компенсировать горизонтальную слагающую земного магнитного поля в том месте, где находилось вращающееся кольцо и таким образом препятствовать возбуждению токов Фуко во вращающихся частях прибора. Две

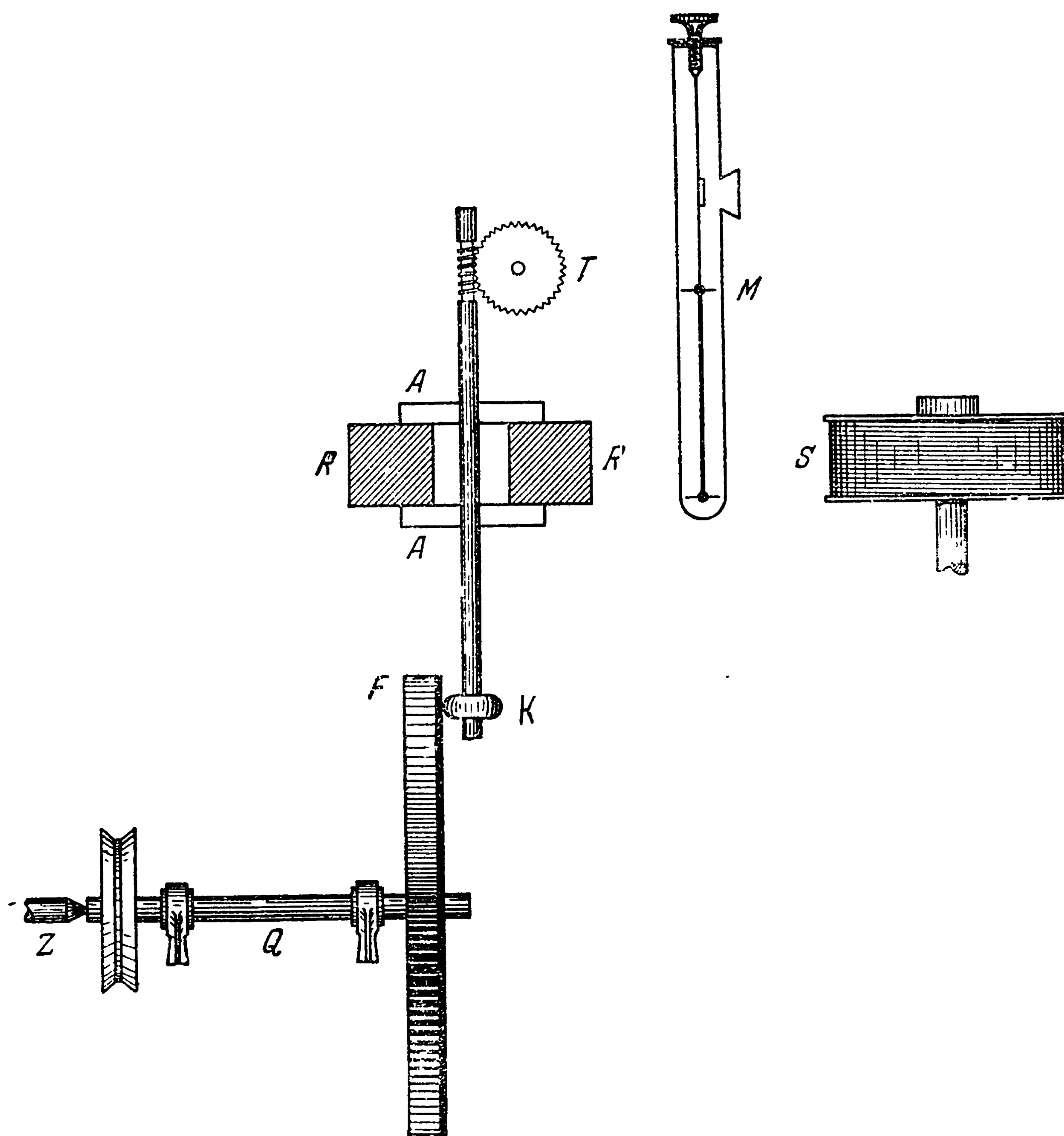


Рис. 1.

обмотки, расположенные параллельно магнитному меридиану (диаметр 170 *см*), позволяли возбуждать пертурбирующее поле заданной силы.

Магнитометр, подвешенный к потолку лаборатории, имел астатические стрелки (длина каждой стрелки 0,3 *см*, расстояние друг от друга 8 *см*), которая вместе с зеркальцем и кварцевой нитью была погружена в трубку, наполненную керосином; благодаря этому приему стрелка устанавлива-

лась апериодически. От пертурбирующих магнитных влияний, обусловленных трамваем, астатическая стрелка была защищена по способу Дюбуа [2] и Рубенса[1] [2]: на трубку магнитометра около стрелки с большим магнитным моментом было надвинуто маленькое колечко из тонкой железной проволоки, которое вокруг этой стрелки несколько ослабляло поле Земли; задавая произвольно пертурбирующее поле при помощи электрического тока в проволочных обмотках, нетрудно было найти такое положение кольца, при котором астатическая стрелка не давала заметных отклонений, т. е. не зависела от внешнего поля. Направляющее поле задавалось двумя маленькими вертикальными магнитами, помещенными вблизи стрелки с меньшим магнитным моментом.

II. ГИПОТЕЗА СУЗЕРЛЭНДА

§ 5. Если мы, основываясь на гипотезе Сузерлэнда (§ 2), сделаем предположение, что во всяком нейтральном атоме его заряды под влиянием силы тяжести перемещены в направлении этой силы, то магнитное поле кольца *RR* (рис. 2), вращающегося вокруг вертикальной оси, должно соответствовать такому магнитному полю, которое получится при движении свободного отрицательного (—) заряда на верхней и свободного положительного (+) заряда на нижней поверхности вместе с вращающимся кольцом *RR*[2]. Магнитное действие отдельных зон кольцевых поверхностей прямо пропорционально их линейным скоростям, и распределение магнитных силовых линий соответствует полю проволочной модели *SS*, на которой проводники распределены так, что средняя поверхностная сила тока каждого оборота прямо пропорциональна его радиусу и токи циркулируют в обеих плоских спиралях в противоположных направлениях. Сила магнитного поля наибольшая в экваториальных плоскостях вращающегося кольца *RR* и модели *SS*; поэтому магнитометр *M* поставлен таким образом, что одна из его стрелок находится в этой плоскости.

§ 6. Силу тока, которую нужно поддерживать в модели *SS* (§ 5), чтобы получить магнитное поле, которое по силе соответствует полю, ожидаемому при вращении кольца *RR*, нетрудно определить, если перейти к уменьшенной модели поля земного шара.

---

[1] H. du Bois und H. Rubens. Elektrotechn. Zeitschr., 15, p. 321, 1894.

[2] Согласно теории Сузерлэнда, такой опыт соответствует в малом масштабе солнечному вихрю. На вопрос, может ли кольцо *RR* или какое-нибудь тело иной формы, находящееся под действием гравитационных сил, вызывать вокруг себя электрическое поле, гипотеза Сузерлэнда непосредственно без определенных добавочных предположений ответа не дает; поэтому отсутствие заметного электростатического поля еще не может служить опровержением гипотезы, и только прямой опыт с вращающимися телами разрешает вопрос.

Согласно гипотезе Сузерлэнда, взаимное радиальное смещение атомных зарядов прямо пропорционально направлению силы тяжести и для Земного шара

$$\rho = kr, \qquad (1)$$

где r есть расстояние от центра земли, а k — постоянная, так как мы предполагаем, что вещество Земного шара однородно. Представим себе весь шар состоящим из ряда шаровых оболочек, толщина которых ρ;

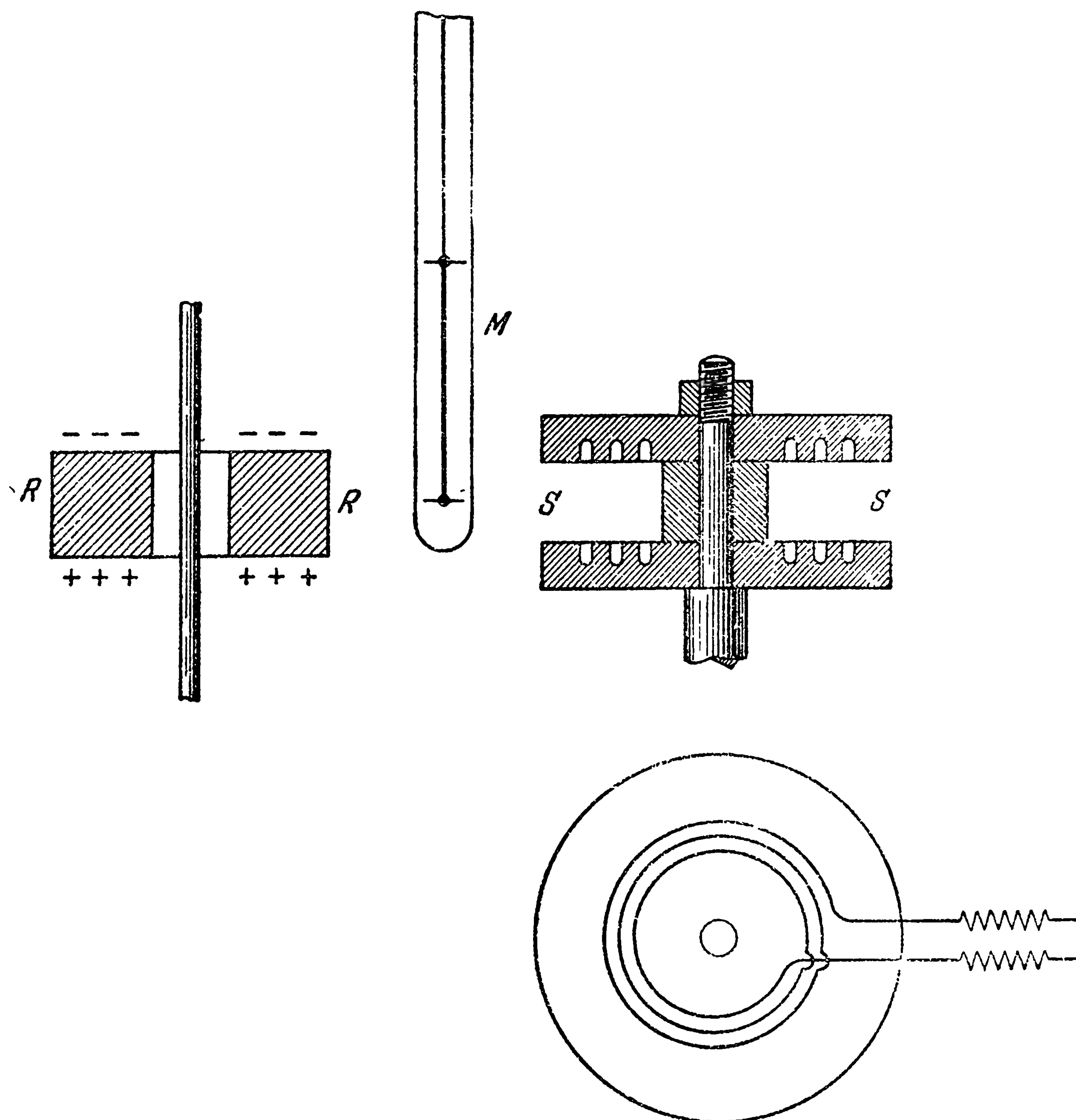


Рис. 2.

обозначая через $\pm e$ те заряды в каждой единице объема материи, которые смещаются под влиянием силы тяготения, мы получаем, что на всей поверхности шара равномерно распределяется отрицательный заряд $-E$

$$-E = -e \cdot 4\pi R^2 \rho = -4\pi k e R^3,$$

соответствующий поверхностной плотности — ε

$$-\varepsilon = -keR. \qquad (2)$$

Для каждой шаровой оболочки внутри шара мы имеем наложение двух противоположных зарядов

$$4\pi e r_1^2 \rho_1 - 4\pi e r_2^2 \rho_2 = + 4\pi e k (r_1^3 - r_2^3),$$

что соответствует избытку объемного положительного заряда, распределенного в шаровой оболочке, объем которой $\frac{4}{3}\pi (r_1^3 - r_2^3)$; отсюда следует, что внутри шара положительный заряд имеет постоянную объемную плотность σ

$$\sigma = + 3ek \qquad (3)$$

и удовлетворяет условию, что сумма поверхностного отрицательного и объемного положительного зарядов равна нулю.

В проволочной модели вращающегося шара удобно все обороты проволоки включить последовательно в одну цепь, чтобы оперировать с одной силой тока; отдельные обороты проволоки должны быть так распределены в шаровом объеме, чтобы «средние плотности» токов на поверхности и внутри шара были прямо пропорциональны расстояниям обмоток от оси вращения.

Рис. 3 представляет такую проволочную модель в разрезе: 13 кружков из эбонита, каждый приблизительно в 1 *см* толщиной, по оси удерживаются латунным болтом и обточены в виде шара диаметром в 12,7 *см* (10^{-9} земного шара). На наружной поверхности каждого кружка выточено по 5 желобков, в которых помещается обмотка из тонкой (0,3 *мм*) медной проволоки; при таком распределении обмотки средние плотности токов на поверхности пропорциональны линейным скоростям зон.

Внутри шара обмотки распределены таким образом, что на каждый оборот проволоки, расстояние которого от оси шара равно b *см*, приходится площадь сечения, равная $(R^2 : 15\,b)$ *см*^{2}. При таком распределении на среднюю пластинку приходится 8 оборотов, а на прилегающие к ней по 8, 7, 6, 5, 3 оборотов проволоки и по 1 обороту на полярных пластинках; проволоки укреплены в желобках, вырезанных в пластинках. Все обороты проволок соединены последовательно так, что ток по поверхностной обмотке проходит в направлении, обратном току в проводниках, расположенных внутри шара; магнитное поле, вызываемое токами, соответствует, согласно гипотезе Сузерлэнда, магнитному полю вращающегося однородного шара.

§ 7. Чтобы определить абсолютные величины тех поверхностных и объемных токов, которые мы имеем в случае вращающегося Земного шара, шаровая модель (§ 6) была помещена очень близко от коротенькой (0,3 *см*) магнитной стрелки тангенс-гальванометра таким образом, что стрелка

находилась в экваториальной плоскости модели. Пропускаем через обмотку тангенс-гальванометра ток такой силы, чтобы вокруг стрелки образовалось поле в 0,34 *гс*, по силе равное полю Земли на экваторе; пропуская через обмотку шаровой модели ток в 0,28 *а*, можно было возвратить стрелку тангенс-гальванометра к нулю; при этой силе тока магнитное поле на экваторе модели численно равно полю Земли на экваторе.

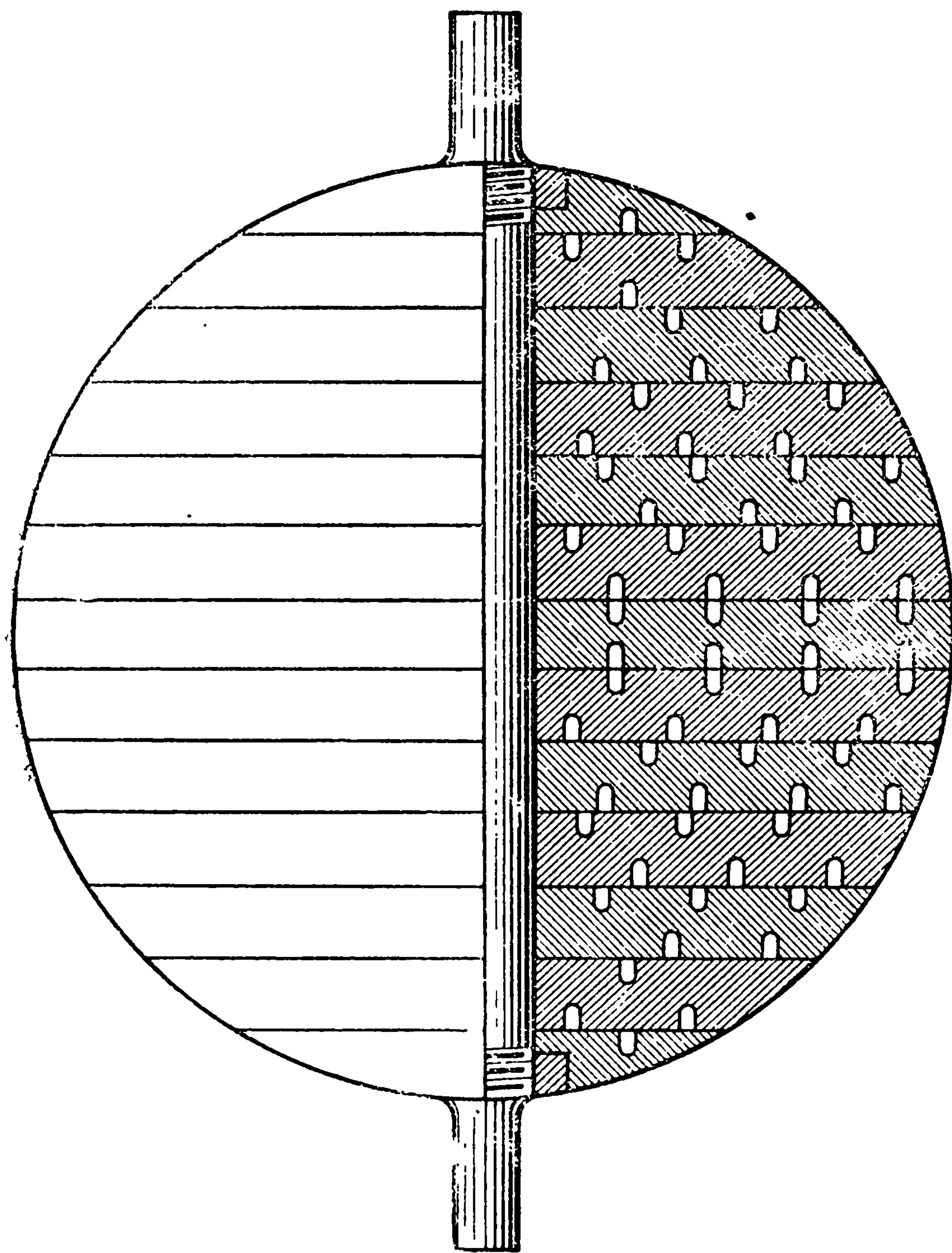


Рис. 3.

Если мы в 1 000 000 000 раз линейно увеличим размеры проволочной модели и сделаем ее равной земному шару, то, согласно «теореме подобия» лорда Кельвина, мы в равное число раз должны увеличить и силу тока в обмотках, чтобы в соответствующих точках пространства для двух моделей получить численно равные магнитные силы; отсюда следует, что сила конвекционного тока на поверхности земного экватора около 1,4 *а* на 1 *см* широты.

§ 8. При опытах (§ 5) число оборотов кольца доходило до 30 000 *об/мин*, что соответствует периферической скорости около 95 *м/сек*, т. е. составляет около 0,2 линейной скорости вращения земного экватора (485 *м/сек*). Так как на периферии проволочной модели кольца *SS* (§ 5) один оборот проволоки приходился на зону в 0,2 *см* ширины, так же как на экваторе шаровой модели (§ 6), то ток в модели *SS*, дающий поле, равное ожидаемому от вращения кольца, будет

$$i = 0{,}28 \times 0{,}2 = 0{,}056\,a.$$

Чувствительность магнитометра была такова, что этот ток вызывал отклонение в 120 делений шкалы.

Опыты, которые были сделаны с кольцами из эбонита, латуни, алюминия, воды и бензола, не дали заметных отклонений магнитометра ($> \pm 0{,}5$ дел. шкалы).

III. ГИПОТЕЗА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СДВИГОВ

§ 9. Основываясь на гипотезе, что атомные заряды смещаются под действием центробежных сил (§ 3) и отрицательный заряд уходит дальше от оси вращения, мы должны ожидать, что магнитное поле вращающегося кольца RR (рис. 4) будет соответствовать движению свободного отрицательного (—) заряда на внешней цилиндрической поверхности и свободного положительного объемного заряда тела вращающегося кольца.

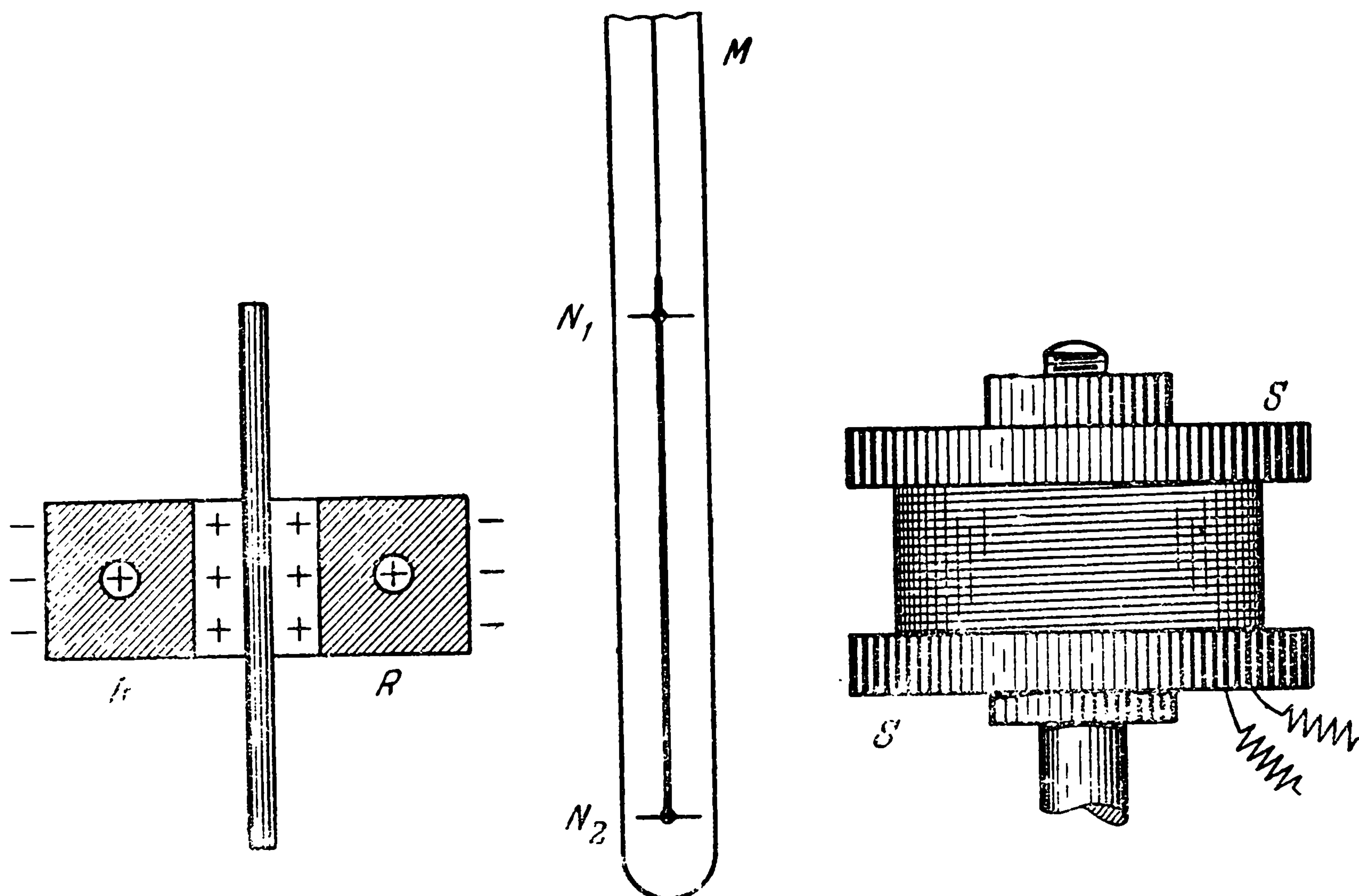


Рис. 4.

Проволочная модель SS (рис. 4) должна слагаться из ряда коаксиальных соленоидов, а магнитометр M так помещен между вращающимися кольцом RR и его моделью SS, что горизонтальные слагающие их магнитных полей могут одновременно действовать на обе стрелки астатической системы.

§ 10. Чтобы выяснить те условия, которым должна удовлетворять обмотка модели, мы можем исходить из предположения, что взаимное сдвижение ρ атомных электрических зарядов прямо пропорционально центробежному ускорению a

$$\rho = ca = c\omega^2 r, \tag{4}$$

где ω — угловая скорость, r — расстояние атома от оси вращения, c — постоянная величина; обозначая через $\pm e$ количества электричества в каждой единице объема тела, перемещающиеся под действием центро-

бежных ускорений при вращении цилиндрического кольца, получают распределение зарядов, указанное на рис. 5; магнитное действие этих зарядов, двигающихся с линейными скоростями v, можно представить как действие следующих зарядов

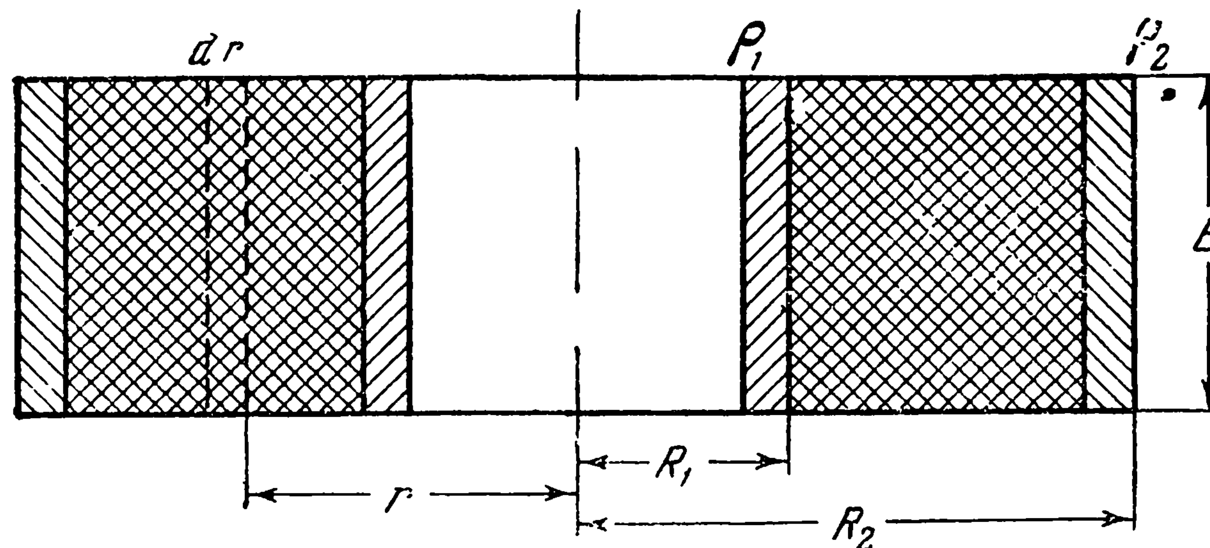


Рис. 5.

a) отрицательного (—) заряда на внешней поверхности кольца, слой которого — ρ_2, линейная скорость движения

$$v_2 = \omega R_2,$$

а магнитное действие соответствует конвекционному току

$$J_{R_2} = -\rho e v_2 = -Ce\omega^3 R_2^2 B; \tag{5}$$

b) аналогичного действия положительного (+) заряда

$$J_{R_1} = +Ce\omega^3 R_1^2 B; \tag{6}$$

c) действия положительного объемного заряда, которое легко определить, если иметь в виду, что отрицательный заряд распределяется на кольцо, которое в $(1 + C\omega^2)^2$ раз больше кольца, содержащего положительный заряд, что обусловливает во всем теле кольца избыток объемного положительного заряда

$$\sigma = 2c\omega^2$$

и соответствует току δi_r в элементарном кольцевом цилиндре, толщина которого dr,

$$\delta i = +2c\omega^2 B r dr. \tag{7}$$

Обозначая через N_1 и N_2 число оборотов проволоки соленоида, намотанных на внутреннюю и на внешнюю поверхность кольца, должно

быть на каждый сантиметр высоты

$$N_2 = R_2^2; \qquad \text{из (5)}$$

$$N_1 = R_1^2. \qquad \text{из (4)}$$

Как легко видеть, внутри кольцевого сечения проволочная обмотка должна быть так расположена, чтобы на каждый квадратный сантиметр приходилось число витков, пропорциональное расстоянию витков от оси вращения

$$n = 2r.$$

Проволочная модель SS (рис. 4) была составлена из соленоидов, намотанных на девяти плотно входивших друг в друга коротких эбонитовых цилиндрах; два эбонитовых фланца и латунный болт скрепляли всю систему. Наружная обмотка состояла из 18 витков проволоки, внутренняя из 2, а остальные 16 витков были распределены на 7 промежуточных соленоидов.

Условия моей работы сложились так неблагоприятно, что я не имел возможности построить шаровую модель согласно требованиям гипотезы центробежных смещений и удовольствовался тем, что по способу, указанному в § 7, определил ту силу тока в модели, которая необходима для получения на экваторе ее магнитного поля, равного по напряжению полю на экваторе Земли (0,34 *гс*); опыты показали, что сила этого тока $J = 0{,}2$ *а*. Для шаровидной модели сила тока должна быть несколько меньше, но во всяком случае не меньше 0,1 *а*.

§ 11. Для того чтобы перейти от условий образования поля вращающимся Земным шаром к условиям вращающегося кольца, можно воспользоваться такими соображениями: если вращаются два подобных кольца из одинакового вещества, соответствующие радиусы которых r_1 и r_2, то силы магнитных полей, образуемых ими в соответствующих точках пространства, согласно теореме подобия лорда Кельвина, тогда равны, когда эквивалентные силы токов в них относятся, как $r_1 : r_2$. Из гипотезы, подлежащей проверке, следует, что для всякого вращающегося кольца эквивалентная сила электрического тока в нем прямо пропорциональна его сечению, величине действующего в нем центробежного ускорения и линейной скорости движения его частей, а, следовательно, отношение эквивалентных токов для двух колец будет

$$\frac{\omega_1^3 r_4^4}{\omega_2^3 r_2^4} = \frac{v_1^3 r_1}{v_2^3 r_2},$$

где v — линейные скорости соответствующих точек; оба вращающихся кольца дают в соответствующих точках пространства равные магнитные поля, если линейные скорости их соответствующих точек равны. Отсюда

следует, что два вращающихся шара из одинакового вещества должны давать в соответствующих точках пространства магнитные поля, силы которых относятся, как кубы их линейных скоростей на экваторах.

§ 12. При опытах § 9 при 30 000 *сб/мин* скорость по периферии составляла около 0,2 линейной скорости вращения экватора Земли (см. § 8). Магнитное действие проволочной модели при токе в 0,1 *а* (см. § 10) соответствует экваториальной скорости по периферии вращающегося кольца; для скоростей, достигнутых при опытах, соответствующая сила тока в проволочной модели $0{,}1 \times (0{,}2)^3 \approx 0{,}001a$; при пропускании такого тока через обмотку модели магнитометр давал отклонение в 10 дел. шкалы.

Опыты, которые были сделаны с кольцами из эбонита, латуни, воды и бензола, не дали заметных отклонений магнитометра.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

§ 13. Как показали опыты, приведенные выше, гипотезы образования магнитных полей вокруг вращающихся тел оказались невыдерживающими прямой опытной проверки. Указанными двумя гипотезами далеко еще не исчерпывается возможная связь движения материи с образованием магнитных полей, которую мы наблюдаем в случае солнечных пятен и явлений нормального геомагнетизма. Другие гипотезы, которые могут быть сделаны относительно этой связи и которые достаточны для объяснения магнитных сил очень больших двигающихся масс, заставляют ожидать, что при условиях и размерах описанных выше опытов могут возникнуть только очень слабые магнитные поля, которые не могут быть обнаружены магнитометрически; для проверки таких гипотез самую схему опытов надо изменить, чтобы получить достаточную чувствительность измерений, во много раз большую той, которой можно было пользоваться при описанных выше предварительных исследованиях.

Изложенные выше исследования были начаты в Физическом институте Московского университета и в настоящее время ведутся мною в Физической лаборатории Московского городского университета имени Шанявского.

В заключение я должен высказать мою благодарность механику А. И. Акулову [4], который сперва в качестве механика Физического института, а потом механика Городского университета помогал и помогает мне при этих трудных исследованиях.

Москва. Ноябрь 1911.

39. ОПЫТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

С тех пор как спектроскоп в руках Кирхгофа и Бунзена впервые дал возможность оптическими средствами проводить элементарный химический анализ веществ, самые методы спектроскопии и задачи ее значительно расширились.

Исследования захватили области по ту и по другую сторону видимого спектра, на две октавы к более коротким ультрафиолетовым волнам и на восемь октав к более длинным инфракрасным волнам теплового излучения, от которых перерывом в четыре октавы отделена область электромагнитных волн Герца, — область тех колебаний, которые мы получаем при электрических разрядах конденсаторов, начиная от волн в несколько миллиметров длиною и кончая волнами, длины которых измеряются сотнями и тысячами километров.

Изменилась и расширилась также и самая задача спектроскопии с тех пор, как работы по электронике выяснили, что вся видимая материя представляет собою лишь сочетание положительного и отрицательного электричества: в полном спектре данного вещества, в спектре, без перерыва идущем от самых длинных до самых коротких волн, мы находим все те периоды, с которыми могут колебаться электроны исследуемого вещества, и, зная эти периоды колебаний, мы непосредственно можем перейти к определению величин тех консервативных сил, которые удерживают электроны в равновесии; а исследуя фотохимические явления для каждой полосы, мы можем определить и степень крепости тех электрических связей, которые характеризуют данный период колебаний электронов; таким образом, исследование полного спектра вещества открывает перед нами возможность проникнуть в геометрическое распределение зарядов в отдельных атомах и молекулах, изучить строение их и подойти к решению самых разнообразных физико-химических вопросов.

Эта огромная задача, которую электронная теория материи ставит спектральному анализу, открывает спектроскопии необозримое поле интересной и плодотворной работы, но она требует для своего решения целого ряда систематически проведенных исследований в разных частях спектра; я позволю себе здесь подробнее остановиться только на тех уже назревших вопросах, разработку которых вполне возможно и необходимо провести в ближайшем будущем, а также указать на одну характерную особенность современного положения спектроскопии: в то время как в областях, прилегающих к видимой части спектра, уже в достаточной мере выработаны методы наблюдений, и уже получены первые основные результаты, в огромной области спектроскопии волн Герца, изучение которой имеет такое большое теоретическое и практическое значение, мы имеем до настоящего времени только работы А. Р. Колли [1], из которых вне сомнений следует, что и для этих волн спектральные особенности вещества (воды, бензола, керосина) резко выражены.

Работы А. Р. Колли как первые спектроскопические работы в области волн Герца, естественно, были ограничены сравнительно небольшим интервалом колебаний; вот почему ближайшей задачей спектроскопии является систематическое определение положений полос поглощения по всей доступной нам шкале электромагнитных волн и отыскание для разных веществ того определенного периода колебаний электронов, с которого начинаются для них отступления от закона Максвелла.

Затруднения, с которыми приходится считаться при выполнении этой задачи, — методологического характера: готовых методов исследования нет, их приходится создавать, разбивая всю шкалу электромагнитных колебаний на отдельные октавы, и строить для каждой октавы свой прибор, в котором электромагнитные колебания возбуждаются искровыми электрическими разрядами: постепенно меняя в приборе его емкость или самоиндукцию, можно без перерыва получать все длины волн в пределах данной октавы и, отсчитывая показания термоэлектрического индикатора, определять, какие именно колебания поглощаются исследуемым веществом. Для волн, длина которых меньше шести сантиметров, можно пользоваться оптическими приемами разложения волны с помощью дифракционных решеток соответствующих размеров.

Как только вопрос об удобных приемах исследования будет решен, выработанным новым методам открывается очень широкое поле приложений не только для систематических спектроскопических исследований, но и для решения ряда отдельных практических задач; уже из некоторых данных работ А. Р. Колли можно заключить, что абсорбционные полосы связаны с структурой молекул и характеризуют определенные химические комплексы, а потому можно ожидать, что спектроскопия в области волн Герца явится мощным орудием химического анализа сложных соединений, т. е. сыграет для химических соединений и смесей ту же роль,

которую спектральный анализ сыграл для элементарного химического анализа; приложение этих методов исследования к технике также не заставит себя ждать и даст возможность найти для приборов беспроволочной телеграфии и телефонии такие изолирующие материалы, которые не давали бы поглощения энергии и вредных нагреваний, мешающих работе радиотелеграфных приборов.

Параллельно с ведением исследований в области волн Герца необходимо вести изучение спектров поглощения чистых веществ и их растворов также в видимом свете, для которого методы точных спектрографических измерений очень хорошо разработаны, а самое проведение исследований не представляет затруднений: эти исследования представляют собою не только самостоятельный интерес (например, в приложении к спектроскопии красящих веществ), но они позволяют детально разобраться в законах строения отдельных абсорбционных полос и дадут указания, в каком направлении наиболее целесообразно будет вести изыскания и в волнах Герца.

Изыскания в видимых лучах и в прилегающем к ним ультрафиолетовом спектре представляют собою особый интерес еще и потому, что в этих волнах резко выражены фотохимические эффекты.

В своих работах П. П. Лазарев [2] показал, что фотохимическая чувствительность в пределах данной абсорбционной полосы определенным образом зависит от окружающей среды; сделанные им абсолютные измерения лучистой энергии, вызывающей фотохимический распад молекул, позволяют разобраться в самом механизме того электрического процесса, который мы называем фотохимическим. Помимо значения этих исследований для определения крепости электрических связей при разных периодах электронных колебаний в молекулах, работы в этом направлении имеют и непосредственное практическое приложение: в технике — для выяснения условий выцветания красок от света (в текстильном производстве и в цветной фотографии), в физиологии — для выяснения процессов цветного зрения, ассимиляции углерода в растениях; в медицине — для фотографии по Финзену [3] и т. д.

Но фотохимические явления не ограничиваются областью видимого спектра; есть указания как в работах А. Р. Колли, так и в работах Розенталя, что тождественные явления имеют место и в случае электрических колебаний, гораздо более медленных, чем колебания света; в них мы имеем постепенный переход от фотохимических эффектов к периодическим химическим реакциям, и поэтому исследование этих явлений представляет собой большой интерес; оно уже и теперь может дать практически важные результаты, выясняя причины тех до сих пор непонятных физиологических эффектов, которые так благотворно действуют при терапевтических приложениях электрических колебаний (термопенетрация токов д'Арсонваля), и способствовать рациональному использованию этого нового терапевтического метода.

Я попытался наметить в общих чертах тот путь, по которому, как мне кажется, должны пойти спектроскопические исследования в ближайшем будущем, оставляя в стороне детали и все те дополнительные и вспомогательные исследования, которые окажутся необходимыми для решения вопроса об электронном строении материи во всем его объеме [1].

---

[1] Изложенный выше доклад был заслушан в заседании Совета Общества имени Х. С. Леденцова [4] 15 марта 1911 г.; по обсуждении доклада Совет постановил ассигновать 12 000 руб. на оборудование и ведение лаборатории и до 3000 руб. на наем помещения.

Позволю себе здесь еще раз высказать Совету как представителю Общества имени Х. С. Леденцова мою глубокую благодарность.

40. РУССКОЕ ОБЩЕСТВО И РУССКИЕ НАЦИОНАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ

Потрясения, которые переживала академическая жизнь в России в текущем году, невольно заставили задуматься и о судьбе русской науки, потому что работы по опытным наукам, которые требуют больших вспомогательных средств и специальных лабораторий, связаны у нас с пользованием помещениями университетов или других высших учебных заведений, а право работать в них, в свою очередь, связано с преподавательскими обязанностями: научные работы не входят в прямые задачи учебных учреждений, — они только пользуются их гостеприимством. При таких условиях работать возможно лишь в свободное от занятий время, и правильный ход научных исследований поставлен в тесную зависимость от правильного хода академической жизни приютивших их учреждений. Русский ученый, у которого есть и способности, и желание работать в области чистой науки, волею судеб поставлен в особенно тяжелые условия благодаря своей крепостной зависимости от учебных учреждений, и если мы теперь, в годовщину 19 февраля, с жутким чувством читали воспоминания о том, как баре помыкали своими крепостными художниками и заставляли их красить заборы, то, может быть, с таким же жутким чувством наши потомки через пятьдесят лет будут читать воспоминания о той учебной барщине, которую отбывали Менделеев, Сеченов, Столетов и ныне здравствующие крупные русские ученые, чтобы только получить право проводить свои ученые работы, чтобы оплатить возможность прославить Россию своими открытиями.

Если русское общество захочет подать руку помощи своим ученым, если оно сознает свою нравственную обязанность перед лицом всего человечества поставить науку в такие условия, в которых она могла бы свободно жить и развиваться, если оно пожелает на будущее время оградить ее от неожиданных потрясений, — общество может сделать это, принимая



Лаборатория П. Н. Лебедева в Физическом институте Московского университета

участие в создании ряда отдельных, специально приспособленных лабораторий, посвященных исключительно научным исследованиям и совершенно независимых от учреждений, преследующих учебные цели. Тот факт, что Москва на частные пожертвования могла построить «Клинический городок» на Девичьем Поле и могла собрать средства для постройки университета Шанявского, позволяет с уверенностью, утверждать, что частные пожертвования найдутся, и что они дадут возможность создать и обеспечить ряд чисто научных лабораторий. Само собой разумеется, что сразу построить «Ученый Городок» невозможно; его придется строить по мере притока средств, постепенно создавая, оборудовывая и пуская в ход одну лабораторию за другой, всегда памятуя при этом, что только хорошо организованная, обеспеченная и работоспособная лаборатория имеет значение для прогресса науки.

Чтобы дать представление о той конкретной форме, в которую помощь общества может вылиться в ближайшем будущем, я остановлюсь здесь на одном частном случае и ограничусь в последующем выяснениями заданий, которым должна удовлетворять физическая лаборатория для научных исследований, во-первых, потому что у нас, в России, в такой лаборатории ощущается особенно острая нужда, во-вторых, потому что могу



Лаборатория П. Н. Лебедева при Университете им. Шанявского

судить о требованиях, устройстве и ведении физической лаборатории на основании личного опыта.

Большие физические лаборатории, исключительно предназначенные для научных исследований, уже давно существуют на Западе: в Англии, Германии, и Америке. Неуклонно разрабатывая научные вопросы, они, как показал опыт, совершенно негаданным образом обогащают технику. Может быть, наиболее ярким примером такой лаборатории является Королевский институт в Лондоне, более ста лет тому назад основанный на частные средства: там Дэви, исследуя явления при прерывании электрического тока, впервые наблюдал «вольтову дугу», которой мы теперь повсюду пользуемся для освещения, а пятнадцать лет спустя, в 1833 году, один из гениальнейших исследователей XIX века, по образовательному цензу помощник переплетчика,

Фарадей наблюдал появление слабых электрических токов в мотке медной проволоки во время передвижения его около магнита. В течение долгих лет этот опыт представлял собой исключительно научный интерес, а теперь его беспрерывно повторяют все электрические станции мира, миллионы лошадиных сил двигают мотки медной проволоки около магнитов и дают нам всю ту электрическую энергию, которой мы пользуемся для освещения и передвижения.

Если взять все то, что дал и дает Королевский институт, обогащая наше знание, то заслуги его основателей перед всем человечеством не поддаются оценке, и ответом на них может быть только чувство нашей глубокой благодарности.

Важное практическое значение чисто научной физической лаборатории в свое время оценил и основатель электротехнической индустрии Вернер Сименс, который пожертвовал большой участок земли и около миллиона рублей на сооружение необходимых зданий. В настоящее время при Палатах мер и весов в Германии, в Англии и в Америке, но совершенно независимо от прямых практических задач этих палат функционируют большие физические лаборатории с постоянным штатом ученых сотрудников и очень большими бюджетами, отпускаемыми на научные исследования из государственных казначейств. Помимо этих государственных национальных физических лабораторий, имеется еще и целый ряд лабораторий, созданных и обеспеченных на частные средства, как Королевский институт в Англии, институты Карнеги в Америке, Нобеля — в Швеции и т. д.

К сожалению, у нас такой национальной физической лаборатории пока еще не существует, но и потребность в ней и необходимые ученые силы налицо. Вот почему русскому обществу следует озаботиться создать такую лабораторию, предварительно обсудив размер и характер этого нового учреждения.

Было бы неправильно ограничить число лиц, которые в нем могут работать, в 5 и 10 человек: уменьшая помещение на несколько комнат или коллекцию приборов в несколько дубликатов, мы тем самым очень немного сократим стоимость постройки здания, его оборудования и эксплуатации, но зато в очень сильной степени урежем научную производительность лаборатории. Очень большого числа занимающихся учеными исследованиями по физике ожидать по существу дела невозможно, но рассчитывать на то, что по меньшей мере на двадцать пять мест будет спрос, — в этом не может быть сомнения [1]. Значительное число занимающихся прежде всего и больше всего, является полезным для самой науки и именно для разработки определенных областей ее, которыми задается данная лаборатория, и на такую коллективную работу я здесь особенно хотел бы указать.

Решение какого-нибудь крупного научного вопроса и самое научное творчество для лиц, мало знакомых с ходом научных исследований, обыкно-

[1] Замечу, что десять лет тому назад, когда я начал устраивать лабораторию научных исследований в Физическом институте Московского университета, у меня работало трое, а теперь, в начале текущего года, их было 28 человек, из которых студентов университета было только 8 человек, а остальные были приват-доценты, лаборанты и оставленные при университете. Желающих заниматься было гораздо более этого числа, но им приходилось отказывать за неимением места; часть не попавших в университетскую лабораторию были устроены П. П. Лазаревым в бедно обставленной и мало приспособленной Физической лаборатории Университета Шанявского.

венно представляется происходящим как бы скачком, в порыве вдохновения, — и, конечно, безусловно верно, что без вдохновения, без этого бессознательного творчества никакой крупный успех в научной деятельности не возможен, но вдохновение подсказывает только основную мысль, а между нею и ее выполнением у физика, может быть, больше, чем у кого-либо, лежит нередко пропасть, через которую только с очень большим трудом, иногда лишь через несколько лет подготовительных работ, удается перебросить мост: для такого моста приходится собирать материал из ранее опубликованных работ разных ученых, а где его не хватает, — подготовлять самому или, разбивая задачу на ряд более мелких вопросов, прибегать к помощи начинающих ученых. Как мне показал опыт в университетской лаборатории, молодые физики охотно берутся за такие частные вопросы, так как каждый из них представляет собою совершенно определенную тему исследования, открывает начинающему ученому заманчивую перспективу самостоятельно разобраться в сложном комплексе явлений, овладеть техникой исследования и нередко ценою очень большого труда, после ряда разочарований, получить, наконец, интересный результат, который не только будет зарегистрирован в текущей научной литературе, но тотчас же в той же лаборатории, на его глазах послужит для дальнейшей разработки связанного с ним вопроса.

Задачи, объединенные между собой определенным планом, сами по себе настолько разнообразны, что о какой-либо односторонности направления работ не может быть и речи: так, в университетской лаборатории под моим руководством одновременно велись работы по коротким акустическим волнам, по теплоемкости газов, диэлектрическим постоянным паров, по электрическим колебаниям и их поглощению, по спектральному анализу и т. д., а под руководством моего помощника П. П. Лазарева — по диффузии, фотохимии, броуновскому движению, скорости реакции и т. д. Как видно из приведенного перечня, индивидуальный вкус и особенности таланта каждого из молодых исследователей при таких условиях могут проявляться и развиваться беспрепятственно.

Само собой разумеется, что всякий самостоятельный выбор темы исследования в том случае, когда такое исследование и не входит в цикл намеченных работ, всегда и во всякой лаборатории может рассчитывать на самую широкую поддержку, так как, только поощряя самостоятельность в работе, мы достигнем наибольшей научной продуктивности самой лаборатории.

Если в защиту большого числа работающих нужно приводить еще аргументы, то я укажу и на важное значение общения каждого работающего с большим числом лиц, заинтересованных тем же делом: такое общение ведет к интересному обмену мнений и нередко помогает разобраться со встретившимися затруднениями в работе, пользуясь хорошим советом или указанием.

Вот те соображения, по которым я считаю, что физическая лабора-

рия должна быть построена не менее как на двадцать пять человек, работающих одновременно.

Теперь перехожу к пояснению, почему для физической лаборатории безусловно необходима постройка специального независимого здания, отвечающего условиям научного комфорта, которым такие здания снабжены в Германии, Англии и Америке. Работать с чувствительными приборами, делать те точные измерения, к которым сводится ряд физических исследований, невозможно на зыбком паркетном полу или в проходной комнате, где температура колеблется скачками, где нет поблизости проведенной воды и т. д.; делать исследования по физике при таких условиях по целому ряду в высшей степени важных и интересных вопросов вообще невозможно: если физику приходится затрачивать нередко много времени и труда, чтобы преодолеть подчас очень нелегкие инструментальные трудности, прежде нежели перейти к окончательным измерениям, то затруднять ему эту работу еще неудобствами помещения равносильно простому лишению его возможности работать. Мне самому приходится испытывать такое стеснение в достаточно резкой форме: поставленный в необходимость в ближайшем будущем устраиваться в наемном помещении, я должен отказаться от продолжения одного уже давно начатого исследования, хотя и располагаю средствами в 15 000 руб., которые Леденцовское общество предоставило в мое распоряжение.

Необходимый комфорт физика заключается в здании, в котором полы прочно покоятся на сводах, где помещения так распределены, что работающие не мешают друг другу, и в каждом помещении имеют возможно равномерную температуру, проведенную воду, газ, электричество. О том, чтобы создать эти условия в каком-либо уже готовом здании, постепенно его приспособляя, конечно, не может быть и речи; в этом отношении вопрос стоит, как мне кажется, совершенно определенно: если общество находит нужным и желательным осуществить физическую лабораторию, то необходимо ассигновать средства, по меньшей мере, 150 000 руб. на постройку здания и 40 000 руб. на оборудование его приборами и приспособлениями [1]. Здание лаборатории можно построить, оборудовать и открыть для занятий в течение двух строительных периодов.

Еще следует обсудить вопрос об ежегодном бюджете физической лаборатории. По самому скромному расчету, общий ежегодный расход по содержанию личного состава служащих, затраты по производству научных исследований и все добавочные накладные расходы (отопление, освещение, ремонт здания и т. д.), на первое время деятельности лаборатории может быть сведен к сумме не менее 20 000 руб. [2] Обеспечение этого

---

[1] Для сравнения замечу, что здание Физического института Московского университета стоило свыше 450 000 руб., а его оборудование — свыше 150 000 руб.; но это здание на две трети отведено под первоначальное обучение студентов.

[2] Замечу для сравнения, что соответствующий ежегодный расход по Физическому институту Московского университета составляет около 50 000 руб.

бюджета является насущной задачей, от решения которой зависит и самое существование будущей физической лаборатории: дело в том, что сложные и интересные исследования по физике требуют не только специально построенных приборов, но еще и целого ряда добавочных приспособлений, характер которых обусловлен особенностями как инвентаря, так и устройства данной лаборатории; эти исследования нередко растягиваются на несколько лет, а поэтому как раз именно талантливые физики, которые могут делать такие работы, не захотят в интересах науки рисковать ни временем, ни огромной подготовительной работой, доверяя их помещениям и средствам плохо обеспеченной лаборатории, а тогда и существование даже хорошо выстроенного и оборудованного здания станет бесполезным.

Ежегодные бюджеты национальных физических лабораторий, состоящих при Палатах мер и весов Германии, Англии и Америки обеспечены из общегосударственных средств, а жизнь общественных научных лабораторий обеспечена бессрочными вкладами в государственные банки; ежегодные субсидии от разных ученых учреждений и обществ дополняют эти бюджеты и позволяют широко ставить ученые исследования.

По сравнению со стоимостями зданий и ежегодными бюджетами физических лабораторий Германии, Англии и Америки приведенные выше цифры для предполагаемой русской физической лаборатории очень скромны; тем не менее они представляют собой солидную сумму, и русское общество, которое будет собирать эти средства, конечно, заинтересуется вопросом: что же именно даст такая лаборатория. А в тех широких кругах, которые стоят далеко от чисто научных задач, может возникнуть еще и другой вопрос: что же будет заставлять физиков работать в такой лаборатории и делать научные исследования, не получающие сразу выгодных для них технических приложений? На оба вопроса можно дать совершенно определенные ответы: на первый, — что по примеру подобных лабораторий на Западе и русская лаборатория даст, вне сомнения, ряд ценных исследований, обогащающих наше знание, открывающих пути к новым техническим приложениям, — результаты деятельности Физического института Московского университета, полученные при условиях, стесняющих научные исследования, могут быть тому порукой, что и у нас в России найдутся люди, способные на такую работу.

На второй вопрос ответ затрагивает интимную сторону научного творчества, и мы можем утверждать, что побуждал и будет побуждать людей посвящать свое время и труд на разработку научных вопросов только прирожденный талант, талант понимать, чувствовать и угадывать стройные соотношения в предвечных законах природы, — талант, который открывает ученому необозримое поле разнообразной и в высшей мере увлекательной деятельности исследователя.

Увлечение научными исследованиями, которое у молодого ученого начинается с интереса к известной области знания, постепенно все больше

и больше захватывает исследователя, так как открывает перед ним все более широкие, иногда совершенно негаданные перспективы.

После первых порывов научного творчества, когда безотчетная жажда исследовать уже несколько успокоена, рядом с элементом личного эгоистического удовлетворения самой работой у ученого постепенно разрастается сознание обязанности научной работы: постоянно пользуясь трудами своих предшественников, ученый может больше, чем кто-либо другой, ежедневно убеждаться в преемственности идей, научается чувствовать и ценить то духовное наследие, которым бескорыстно одарили его и его сверстников предыдущие поколения, и, естественно, у него является сознание нравственной обязанности перед будущими поколениями так же работать, покуда хватит силы, как работали его предшественники.

Не всякий, конечно, имеет склонность к научной деятельности, но у всякого культурного человека не может не быть чувства нравственной обязанности что-нибудь сделать для прогресса человечества, — если он облегчит научную работу своих современников, предоставляя для того необходимые материальные средства, то таким образом и он добровольно и сознательно сам становится в их ряды деятельным помощником.

Только рассчитывая на такое понимание задач, которые преследуют чисто научные учреждения, мы можем ожидать встретить в обществе отклик и широкую материальную поддержку, без которой научные учреждения существовать не могут.

Создавая хорошо оборудованные лаборатории, давая в них приют своим ученым, раскрепощая в них свои творческие научные силы, чтобы использовать их возможно широко, Россия воздвигла бы в этих храмах чистой науки самый прочный юбилейный памятник 19 февраля 1861 г.

41. ПРЕДЕЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА КОРОТКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Попыткам получить очень короткие акустические волны положен предел поглощением этих волн благодаря внутреннему трению и теплопроводности тех газов, в которых они распространяются. Имеющиеся теоретические и опытные исследования позволяют легко определить эту границу.

Так, Стокс [1] уже в 1845 году показал, что при распространении звуковой волны в воздухе она поглощается благодаря внутреннему трению в газе: бегущая плоская волна, амплитуда которой v_0, после пробега пути x имеет меньшую амплитуду

$$U_0 = U_0 e^{-mx}. \tag{1}$$

По Стоксу,

$$m = \frac{8\pi^2\mu}{3\lambda^2\rho\alpha}, \tag{2}$$

где

μ — коэффициент внутреннего трения газа;
λ — длина звуковой волны;
α — скорость звука;
ρ — плотность газа.

Кирхгоф[2] в 1868 году указал, что при своем распространении звуковая волна слабеет и от обмена тепла, обусловленного теплопроводностью газа, — потеря, которая налагается на потерю, указанную Стоксом.

По Кирхгофу,

$$U = U_0 e^{-(m+w)x}, \tag{3}$$

$$w = \frac{2\pi^2}{\lambda^2\rho\alpha} \cdot \frac{K}{C_p}\left(\frac{C_p}{C_v} - 1\right), \tag{4}$$

---

[1] G. Stokes. Math. and Phys. Papers, 1, p. 100. Cambridge, 1880.

[2] G. Kirchhoff. Pogg. Ann., 134, p. 177, 1868; Ges. Abh., p. 540. Leipzig, 1882; См. также B. Brunhes. Journ. d. Phys., (3) 6, p. 289, 1897.

где

K — коэффициент теплопроводности газа;
C_p — удельная теплота для $p = \text{const}$;
C_v — удельная теплота для $v = \text{const}$.

К внутреннему трению и теплопроводности прибавляется еще потеря, обусловленная тепловым излучением, но эта потеря, как указал лорд Рэлей [1], очень незначительна.

Упомянутые работы изложены в их взаимной связи в сочинениях лорда Рэлея [2], Ламба [3] и Ауербаха [4] [1].

Недавно Джинс [5] [2] указал еще на одну поправку, которую необходимо принимать во внимание при вычислении затухания бегущей волны, — поправку, вытекающую из особых представлений о структуре и форме молекул; эту поправку Джинса можно ввести, соответственно увеличивая коэффициент μ внутреннего трения:

$$\mu' = (1 + 0{,}146)\,\mu. \tag{5}$$

Из уравнения (3) следует, что сила звука J после того, как плоская волна пробежала путь x, выражается так:

$$J = J_0 e^{-2(m+w)x} = J_0 e^{-A\frac{x}{\lambda^2}}, \tag{6}$$

$$A = \frac{4\pi^2}{\alpha\rho}\left[\frac{4}{3}\mu + \left(\frac{C_p}{C_v} + 1\right)\frac{K}{C_p}\right]. \tag{7}$$

В том случае, когда звуковая волна распространяется в воздухе при 18° и 753 *мм* давления, мы можем воспользоваться следующими числовыми величинами постоянных:

$$\mu = 0{,}000185; \; [\textit{см}^{-1}\cdot\textit{г}\cdot\textit{сек}^{-1}]$$

$$\rho = 0{,}00120 \; [\textit{см}^{-3}\cdot\textit{г}],$$

$$\alpha = 3440 \; [\textit{см}\cdot\textit{сек}^{-1}],$$

$$C_p = 0{,}237 \; [\textit{кал}\cdot\textit{г}^{-1}],$$

$$\frac{C_p}{C_v} = 1{,}40;$$

$$K = 0{,}000053 \; [\textit{кал}\cdot\textit{см}^{-1}\cdot\textit{сек}^{-1}].$$

---

[1] Lord Rayleigh. Scient. Papers, 4, p. 376. Cambridge, 1903.
[2] Lord Rayleigh. Theory of Sound, 2, p. 100. Cambridge, 1896.
[3] H. Lamb. The dynamical theory of Sound, p. 183. London, 1910.
[4] F. Auerbach. Winkelmann's Handb. d. Phys., 2, p. 553. Leipzig, 1909
[5] J. Jeans. The dynamical theory of Gases, p. 302. Cambridge, 1904.

Постоянные μ, ρ, α, C_p и C_v взяты мной из таблиц Ландольта и Бернштейна, а постоянная K заимствована из работы Тодда [1] [3].

Постоянная A (уравнение (7)), по Кирхгофу, имеет числовое значение

$$A = 0{,}000\,32. \tag{8}$$

С поправкой Джинса (уравнение (5))

$$A' = 0{,}000\,37. \tag{9}$$

Непосредственные измерения Неклепаева [2] [4] дают

$$A_0 = 0{,}00073 \pm 0{,}00005. \tag{10}$$

Отсюда следует, что постоянная A, найденная Неклепаевым как результат непосредственных измерений, в порядке величины соответствует ожидаемой теоретически, но численно около двух раз больше теоретической. Такая разница лежит вне возможных ошибок измерений; но остается открытым вопрос, насколько мы в праве пользоваться, по Стоксу и Кирхгофу, теми коэффициентами, которые были измерены при установившихся процессах трения и теплопроводности, и прилагать их к процессам, которые перемещаются в пространстве со скоростями звука, т. е. со скоростями, близкими к скоростям молекул газа, и которые периодически меняются на расстоянии длины волны; а эта длина не бесконечно велика по сравнению с длиной среднего свободного пути молекул.

В общих чертах опыт и теория согласно свидетельствуют, что звуки средней высоты сколько-нибудь заметно не поглощаются воздухом. Для коротких акустических волн это поглощение становится уже заметным; полагая что постоянная $A = 0{,}00073$ не увеличивается для коротких волн, легко вычислить тот путь l, пробегая который звуковая волна ослабляется до одной сотой доли своей первоначальной силы; эти пути суть:

для $\lambda_1 = 0{,}8$ *мм*	$l_1 = 40$ *см*
$\lambda_2 = 0{,}4$	$l_2 = 10$
$\lambda_3 = 0{,}2$	$l_3 = 2{,}5$
$\lambda_4 = 0{,}1$	$l_4 = 0{,}6$

Тут мы подходим к предельным величинам коротких акустических волн.

Москва. Март 1911.

---

[1] G. W. Todd. Proc. Roy. Soc., **83**, p. 36, 1909.

[2] Н. Неклепаев. ЖРФХО (часть физ.), 43 (1), стр. 101, 1911; Ann. d. Phys., 35, p. 175, 1911.

42. ПАМЯТИ ПЕРВОГО РУССКОГО УЧЕНОГО 1711—1911 гг.

«Я вижу, что должен умереть, и спокойно смотрю на смерть; жалею только о том что не мог совершить всего того, что предпринял для пользы отечества, для приращения наук и для славы академии и теперь при конце моей жизни должен видеть, что все мои полезные намерения исчезнут вместе со мной» (из бесед Ломоносова со Штелином [1]).

Двести лет тому назад, на далеком севере, в семье зажиточного рыбопромышленника родился Михаил Васильевич Ломоносов, талант, жизнь, труды и судьба которого дали нам прообраз русского ученого со всеми теми особенностями, которые лежат в характере народа и в условиях окружающей среды.

Описание первой части его жизни, годов учения, читается как увлекательный рассказ: бегство из дома, голодное существование в Москве в Заиконоспасской академии, о котором сам Ломоносов говорит, что то была «несказанная бедность; имея один алтын в день жалованья, нельзя было иметь на пропитание в день больше, как на денежку хлеба, на денежку квасу, прочее на бумагу, на обувь и на другие нужды». В Москве в течение пяти лет, учили его не тому, к чему тянул его природный талант, а тому, чему обучать полагалось: латинскому стихосложению, риторике, богословию и т. д. Попытка Ломоносова разыскать в Киеве настоящих учителей и настоящую науку тоже была неудачна, и только случайно сложившиеся обстоятельства дали ему то, что он искал: барон Корф решил послать способных молодых людей учиться за границу, — по его указанию академия наук затребовала у московской Заиконоспасской академии списки рекомендуемых семинаристов, и Ломоносов был послан за границу для обучения философии, физике и горному делу.

В Марбурге у знаменитого в то время философа Вольфа [2] он впервые узнал, что представляет собою настоящая живая наука; с жадностью набросился он на изучение естествознания и поражал своего учителя одновременно и своими удивительными успехами в науках, и не менее удивительной бесшабашностью своей студенческой жизни. Пять лет, проведенных в Германии, вполне подготовили Ломоносова к самостоятельной научной работе: его исключительные способности позволяли ему за этот сравнительно короткий учебный срок разобраться в господствовавших научных течениях, освоиться с методами исследований и получить богатый запас положительных знаний, а природный ясный и пытливый ум подсказывал ему длинный ряд интереснейших научных задач. Пребывание в Германии и еще в одном направлении расширило его кругозор. На примере своего учителя Вольфа, Ломоносов видел, что плодотворная научная деятельность обусловлена не только личными занятиями ученого, но и созданием школы для подготовки ученых работников; в Марбурге Ломоносову стало ясно, что ученая сила немецкого университета кроется в преемственности знания.

Вполне подготовленный к самостоятельной ученой деятельности, живой, сильный, с жаждой возможно широко использовать свои способности, 30-летний Ломоносов вернулся на родину. В Петербурге он нашел ученое и учебное дело в самом жалком положении: членами академии наук были по преимуществу немцы, которые на своем острове отмежевались от остальной России; за немногими исключениями это были люди мало способные [3], в лучшем случае аккуратно служащие чиновники, в худшем — люди, наживавшиеся разными способами. С первых же шагов своей петербургской деятельности страстный и увлекающийся Ломоносов объявил войну налаженному укладу академической жизни: сам вышедший из народа, на себе испытавший все мытарства учения в России, он не мог ограничить свою деятельность учеными исследованиями, как это делали его иностранные коллеги по академии, — он видел перед собой другую задачу, которую ставила ему русская жизнь: создать и обеспечить в России возможность научной работы.

Учебные пособия, которыми располагала академия наук, ограничивались кунсткамерами и музеями, предназначенными для личных занятий академиков и для демонстрации высоким посетителям, а на долю адъюнкта Ломоносова, которому было поручено «занятие химией», не полагалось и этих скромных пособий. Ломоносов был поставлен в необходимость прежде всего выхлопотать себе средства для работы и решил создать первую в России научную лабораторию, в которой он мог бы не только сам проводить свои исследования, но и давать возможность начинающим молодым ученым работать под его руководством. В архивах академии сохранилось прошение Ломоносова: «Минувшего 1742 года, в Генваре месяце, подал я, нижайший, в академию наук предложение о учреждении химической лаборатории, которой еще при академии наук не было, где бы я, нижайший,

мог для пользы отечества трудиться в химических экспериментах; однако на оное мое прошение не учинено никакого решения. И понеже я, нижайший, в состоянии нахожусь не токмо химические эксперименты для приращения натуральной науки в Российской Империи в действо производить и о том журналы и рассуждения на российском и латинском языке сочинять, но при том еще могут других обучать физике, химии и натуральной гистории, и того ради имею я, нижайший, усердное и искреннее желание наукой моему отечеству пользу чинить, в химических трудах беспрестанно упражняться и как химической практике, так и теории с присовокуплением физики и натуральной минеральной гистории других желающих обучать». На этом же прошении помечена и резолюция: «Адъюнкту Ломоносову отказать».

Только через шесть лет после первого прошения Ломоносов, наконец, получил в свое распоряжение маленькую, бедно обставленную химическую лабораторию [4], в которой он мог начать учить и работать. Но здесь, в лаборатории, перед ним встала другая, еще большая трудность, которая мешала ему отдаться научным исследованиям и настоятельно требовала резрешения: работающими в новой химической лаборатории являлись такие же семинаристы, командированные семинариями, по требованию академии наук, каким когда то был сам Ломоносов, а поэтому не только их недостаточная научная подготовка, которую давала схоластическая духовная школа, но и случайность в назначении заниматься науками ставили руководителя лаборатории в совершенно невозможные условия. Ломоносов видел один выход из этого положения: надо было создать светскую школу, по образцу немецких гимназий, которая давала бы достаточно подготовленных студентов: помимо других препятствий, тут пришлось еще считаться и с поголовной бедностью русской учащейся молодежи, о которой Ломоносов свидетельствует, что «гимназисты и студенты жалованье получали весьма малое и, тем еще поделясь с бедными своими родителями, претерпевали скудность в пище и ходили по большей части в рубище, а оттого и досталь теряли охоту к учению».

Недостатки той учебной организации, которая постепенно развивалась при академии наук из обучения прикомандированных семинаристов, были ясно видны Ломоносову, как лицу, близко стоящему к учащейся молодежи: она не давала ни стране, ни самим учащимся того, что могли дать правильно поставленные систематические занятия науками; Ломоносов стал ратовать за учреждение университетов и особенно настаивал на том, что и в России «не худо, чтобы университет и Академия имели по примеру иностранных какие-нибудь вольности, а особливо, чтобы они освобождены были от полицейских обязанностей». Известно, какую роль сыграл Ломоносов, когда Шувалов [5] «Московский университет по примеру иностранных учредить намеревался, что весьма отрадно», и как пользовался Шувалов «советами тех, которые университеты не токмо видели, но в них несколько лет обучались, так что их учреждения,

узаконения, обряды и обычаи в уме ясно и живо как на картине представляют». Особенно озабочен был Ломоносов и в этом случае организацией подготовительного среднего образования: «При университете необходимо должна быть гимназия, без которой университет — как пашня без семян».

Ту же мысль осуществил Ломоносов, основывая петербургский университет и гимназию при нем, он принимал в жизни этих учреждений деятельное участие как их непосредственный руководитель.

Сколько работ и сил должен был затратить Ломоносов, создавая русские университеты и гимназии, — это теперь вряд ли поддается учету; сам Ломоносов указывал, какие препятствия ему ставили в этом деле, помимо других, его влиятельные ученые коллеги: «Куда столько студентов и гимназистов? Куда их девать и употреблять будем? Сии слова твердил часто Тауберт [6] в канцелярии академии, и хотя ответственно, что у нас нет природных россиян ни аптекарей, да и лекарей мало, также механиков, искусных горных людей, адвокатов и других ученых, и ниже своих профессоров в самой академии и в других местах. Но не внимая сего, всегда твердил и другим внушал Тауберт: куда со студентами?» С своей точки зрения, конечно, и Тауберт был прав: Тауберту все эти русские гимназисты и русские студенты действительно ни на что не были нужны.

Поставив себе сначала, казалось бы, очень скромную задачу — создать школу русских химиков — Ломоносов, желая выполнить ее, должен был все шире и шире раздвигать первоначальные рамки и постепенно, шаг за шагом, насадил в России светскую среднюю школу — гимназию — и высшую школу — университет. Оценивая эту просветительную деятельность Ломоносова, следует признать, что после Петра Великого вряд ли кому Россия больше обязана своим культурным развитием, чем Михаилу Васильевичу Ломоносову, и, конечно, не на гениального пионера европейского просвещения падает вина, что после его смерти «все его полезные намерения исчезли вместе с ним».

Выступая реформатором культурного строя России, Ломоносов не мог опираться на свой бесспорный авторитет выдающегося ученого, — он находил необходимую поддержку в том всеобщем восхищении, с которым приветствовали его, как создателя звучного литературного русского языка.

То совершенно исключительное положение, которое Ломоносов по праву занимает в истории русской словесности, было также обусловлено прирожденными свойствами естествоиспытателя: приступая к изучению русского языка, Ломоносов не пошел по пути ученого схоластика-филолога, а приложил и здесь приемы естествоиспытателя: он внимательно прислушивался к тому живому русскому языку, которым говорили, бранились и шутили окружающие, и к радости своей открыл, что этот язык имеет весь тот запас слов, который необходим для легкого выражения самых сложных мыслей. Для Ломоносова живой, разговорный русский

язык был явлением природы, а его грамматика должна была только подмечать и описывать те законы, которые управляют языком, но не предписывать этому свободному языку каких-нибудь сочиненных, стесняющих его обязательных правил. Ломоносов имел храбрость начать писать живой разговорной речью, и современники были поражены красотами и гибкостью того самого языка, которым они и раньше постоянно пользовались в обиходе. Ломоносов, как естествоиспытатель, только открыл давно до него существовавший язык, рядом с которым современный ему латинизированный книжный язык стал вдруг совершенно ненужным, лишним, нелепым; восторг, с которым Россия приветствовала литературные выступления Ломоносова, был прочно обоснован не только в неожиданных красотах Ломоносовского языка, но также и в сознании, может быть, не всегда высказывавшемся, что новый книжный язык доступен и без утомительного обучения.

Для Ломоносова язык сам по себе не был целью, — для него он был только могучим средством, которым он постоянно пользовался, чтобы просвещать и учить русское общество. В своих литературных произведениях Ломоносов все время остается ученым: во всех одах, написанных по заказу и согласно требованиям времени в ложноклассическом стиле, он всегда ставит определенные тезисы, а потом логически развивает и доказывает их. В совершенстве владея звучным стихом, Ломоносов, очаровал своих современников, и, пользуясь этим увлечением, неуклонно шел к своей главной цели, воспитывая русское общество и заставляя его задумываться над новыми чуждыми ему идеями.

Общественная деятельность Ломоносова, как реформатора всей культурной жизни страны и ее языка, принесла свой плод и с глубокой благодарностью будет вспоминаться потомками. Иная судьба была суждена его ученой деятельности, для которой он прошел тяжелый путь от рыбачьего баркаса до кафедры академии наук: она не дала даже ничтожной доли тех результатов, которых естественно было от нее ждать, — она стала лишь прообразом трагической судьбы ученого в России.

Все современники, знавшие Ломоносова — и между ними гениальный Эйлер — ожидали от этого самородка совершенно исключительных научных исследований; казалось,что все задатки для такой деятельности счастливо сочетались в его лице: огромный природный талант естествоиспытателя, ясный, независимый ум, широкий кругозор, большой запас знаний, несокрушимая воля, железное здоровье и желание всецело отдаться любимому делу, — но судьба поставила Ломоносова в те чисто русские условия деятельности, при которых никакой талант ученого не мог ему помочь, хотя он находился, казалось бы, в наивыгоднейшем положении, как состоящий на ученой службе адъюнкта, а потом профессор академии наук. Если ограничиться только названием «ученая служба», то непродуктивность ученой деятельности Ломоносова останется навсегда непонятной, но она не потребует дальнейших объяснений, если только перечис-



М. В. Ломоносов

лить его служебные обязанности, а именно: аккуратное посещение академических заседаний, писание многочисленных рапортов в канцелярию по поводу всяких мелочей учебного обихода, обучение и экзамены студентов по химии, физике, истории, пиитике и риторике, техно-химические анализы, переводы, цензура и корректура книг, печатаемых в академической типографии, сочинение од и трагедий, а равно и разработка детальных планов иллюминаций по поводу разных торжественных случаев и т. д. Для выполнения всех этих обязанностей никаких талантов не требуется, но когда Ломоносову было предписано в дополнение ко всему остальному еще «написать Российскую историю его штилем», т. е. заняться тем делом, которое ему, как профессору химии, было по существу ново и чуждо, то Ломоносов «сказал в собрании профессорском, что-де он, имея работу сочинения Российской истории, не чает так свободно упражняться в химии, и ежели в таком случае химик понадобится, то он рекомендует ландмедика Дахрица». Если к этому прибавить, что, начиная свою ученую службу, Ломоносов шесть лет, — может быть, лучших лет своей жизни, — потерял для работы, не имея даже плохонькой лаборатории, то ужас положения, в котором находился первый русский ученый-великомученик и та душевная трагедия, которую он не мог не пережить, и теперь заставляют нас задуматься.

Всякий, кому приходится знакомиться с учеными трудами Ломоносова, не может не подумать с горьким, щемящим чувством, какой огромный талант бесследно и бесполезно погиб для науки! Везде: в химии и в минералогии, в физике и в наутике у Ломоносова масса проблесков подчас гениальных мыслей, везде виден тонкий, чуткий наблюдатель, смело и широко ставящий задачи исследований, во многих случаях задачи первостепенной важности, которые только впоследствии, в обработке западных ученых получили решающее значение для науки: в своих рассуждениях и опытах относительно неразрушимости материи при окислении он предвосхищал мысли, впоследствии высказанные Лавуазье, а в своих рассуждениях по кинетической теории газов в связи с механическим представлением о причине теплоты и о вечности энергии он на столетие заглядывал вперед. Но все эти работы носят у Ломоносова отпечаток тех невозможных окружающих условий, в которых они зарождались: разработка их в большинстве случаев только начинается и обрывается на интересном месте исследования, — видно, что не разочарование в задаче или в своих силах вызвали перерыв, а внешние неизвестные причины и невольно перед глазами встает во весь огромный рост трагическая фигура ученого, который не мог не чувствовать, что со всеми своими талантами он не может дать науке и того немногого, что дает ей рядовой ученый на Западе, работающий в нормальных условиях.

Измученный, умирающий Ломоносов не переставал болеть душой о судьбах русской науки, не переставал бояться за ее будущее, и русская действительность показала, что его опасения были не напрасны, —

произошло то, что было бы чудовищно, невероятно на Западе: через пятьдесят лет после смерти его забыли на родине, в том городе, где он учил и работал: в начале прошлого века были напечатаны в Петербурге русские трактаты по кораблевождению, по минералогии и по геологии, и в них не упоминалось даже имени Ломоносова, хотя им как раз в этих вопросах было сделано и опубликовано много больше того, что давали эти русские учебники.

Не посчастливилось и самому дорогому детищу Ломоносова — университетам: вызванные к жизни настоящим ученым, предназначенные им служить учеными центрами и оплотами научной деятельности в России, они в руках его преемников, может быть и добросовестно не понимавших ни значения, ни запросов науки, обратились в скромные учебные заведения, в которых пребывание науки не обязательно, а если и разрешается, то только в свободное от занятий время.

Ломоносов и чувствовал, и верил,

«Что может собственных Платонов
И быстрых разумом Невтонов
Российская земля рождать».

Жизнь показала, что предчувствия его оправдались: Россия дала Менделеева, Мечникова, Павлова, Тимирязева и внесла работы их в сокровищницу человеческого знания.

Ломоносов все силы души положил на то, чтобы создать в России такие условия, при которых могли бы развиваться и работать эти собственные Платоны и Невтоны, — но и в этом отношении Россия за двести лет не очень далеко ушла вперед: если присмотреться к работе наших выдающихся ученых, то приходится утверждать, что в большинстве случаев они дали крупные исследования не благодаря тем условиям, в которых они работали в России, а вопреки им: личные свойства характера или счастливо сложившиеся обстоятельства помогли им выйти победителями, — и только имена этих немногих победителей, их мысли и их заслуги стали известными в широких кругах русского общества; но надо было бы спросить тех, кто близко знает Ломоносовские условия, в которые поставлены русские ученые исследования, и с которыми должна бороться за свое существование русская ученая школа, чтобы поверить, какое число уже начатых интересных исследований, как и у Ломоносова, неожиданно обрывается, какое число людей с несомненными проблесками таланта гибнет благодаря им и для науки и для страны: числа эти ужасающие.

Если бы русское общество, вспоминая все то, что оно получило в наследие от реформатора своего языка и своей умственной культуры, захотело не словом, а делом выразить признательность памяти Ломоносова,— оно могло бы сделать это, осуществляя заветную мечту первого

русского ученого, — создавая и обеспечивая в России такие центры нашей научной работы, в которых эта работа могла бы итти беспрепятственно. Эти научные центры, вне сомнения, дадут ряд важных и полезных работ, а самое существование их благотворно отзовется на жизни общества, поднимая и его самосознание, и его культурный уровень. Заботясь об успехах науки, общество будет заботиться о себе самом: не увлекающийся поэт, а зрелый мыслитель, много передумавший и перечувствовавший, взвешивая каждое слово, сказал:

«Науки юношей питают,
Отраду старцам подают,
В счастливой жизни украшают,
В несчастный случай берегут».

43. СПЕКТРОГРАФ ДЛЯ УЛЬТРАКРАСНЫХ ЛУЧЕЙ

Предполагая в лаборатории Физического института Московского университета организовать систематическое исследование ультракрасного спектра спектрографическим путем, я должен был отказаться от болографического метода Лэнглея [1], потому что гальванометр, несмотря на магнитную защиту, дает слишком непостоянное положение нуля, и поэтому решил заменить болометр видоизмененным микрорадиометром Бойса.

Распространяя исследование до $\lambda = 15\mu$, т. е. в области, где диффузный свет с более короткими длинами волн может ввести значительные ошибки, пришлось прибегнуть к методу двойного спектрального разложения и дать прибору следующее расположение (рис. 1, горизонтальная проекция); на куске широкого железного швеллера по рельсу перемещается зеркало S ($f = 25$ *см*), которое лучи от источника N собирает на широкую щель K, находящуюся в фокусе зеркала S_1 ($f = 50$ *см*). Отсюда пучок параллельных лучей падает на призму P из каменной соли ($\varphi = 30°$), отражается от ее посеребренной задней стенки и с помощью зеркала S_2 собирается на узкой щели М. Лучи, вырезанные из спектра щелью M, отражаясь от зеркала S_3, падают на вторую призму P_2 из каменной соли ($\varphi = 30°$), отражаются от посеребренной задней стенки этой последней и зеркалом S_4 собираются на спае микрорадиометра R.

Для того чтобы пучки, входящие и выходящие из призм, по возможности сблизить друг с другом, зеркала S_1, S_2 и S_3, S_4 были частью срезаны, как это показано на рис. 2. Чтобы охранить поверхности призм и окошко микрорадиометра от действия влажности воздуха, все оптические части находились внутри кожухов, плотно привинченных к швеллеру.

Все спектрограммы должны были начинаться от желтой линии натрия; чтобы проверять эту установку на спай микрорадиометра, служила труба F.

Для то́го чтобы согласовать движение призм P_1 и P_2, оси несущих их поворотных столиков сочленены шарнирным приспособлением B_1B_2. Не входя здесь в детальное описание монтировки зеркал, микрометрической щели, осей столиков и станины радиометра, замечу только, что они были старательно выполнены механиком лаборатории А. Акуловым.

Рис. 1.

Для того чтобы равномерно двигать фотографическую пластинку A (см. рис. 1), на которую при помощи света от лампы накаливания L регистрировалось отклонение радиометра R, и одновременно поворачивать призму P_2 на определенный угол при помощи рычага H, служил скалковый масляный насос «клепсидра», который был выполнен по моим чертежам заводом Кирхгофа в Москве. Устройство этого приспособления видно из рис. 3 (вертикальный разрез): при помощи колеса K и стальной ленты T скалка насоса подымалась вверх, причем густое машинное масло через клапан Q проходило в нижнюю часть прибора; при наивысшем положении скалка насоса колеса K закреплялась винтовым тормозом, и

тогда вставлялась кассета *A* с фотографической пластинкой и винтом *V* привинчивалась к подвижной части насоса.

Освобождая затем тормоз колеса *K*, можно было, не сотрясая прибора, пускать в ход все приспособление. Под тяжестью груза скалка начинала опускаться и выдавливала масло через отверстие *J* (при приборе имелось несколько латунных пробок с разными отверстиями, так что время, необходимое для передвижения фотографической пластинки на всю ее длину, можно было изменять от нескольких минут до целого часа.

Скалка насоса, опускаясь, увлекала за собою кассету *A* с фотографической пластинкой и ребром клина *E*, отодвигала конец рычага *H* (см. рис. 1), который прижимался к нему пружиной *D*.

Для того чтобы при снятии спектров поглощения в области длинных волн пользоваться максимальной чувствительностью радиометра и избежать чрезмерно больших отклонений в наиболее ярких частях

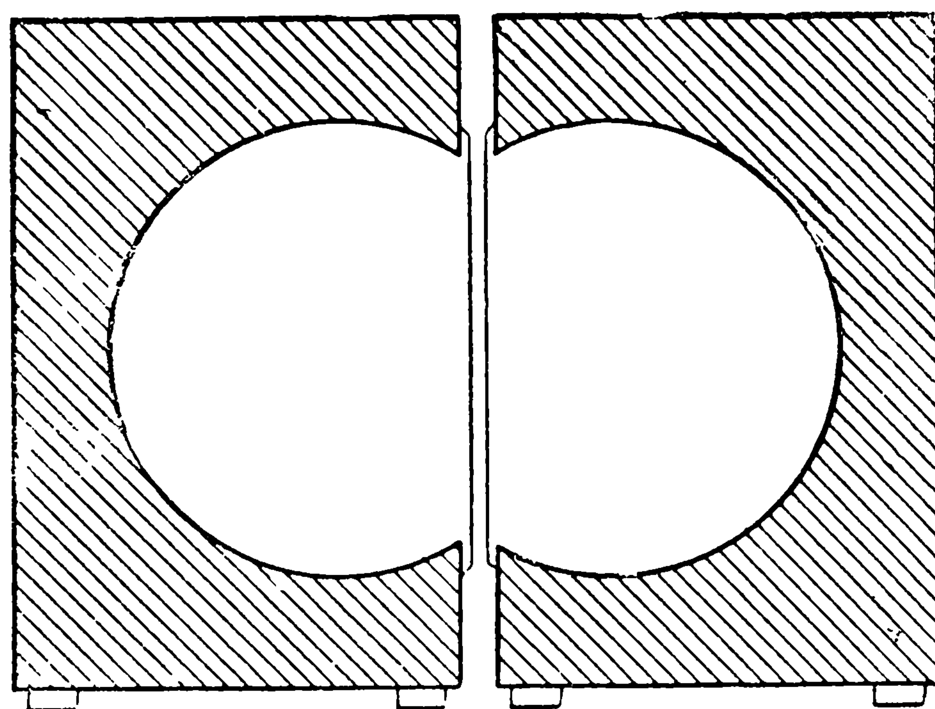


Рис. 2.

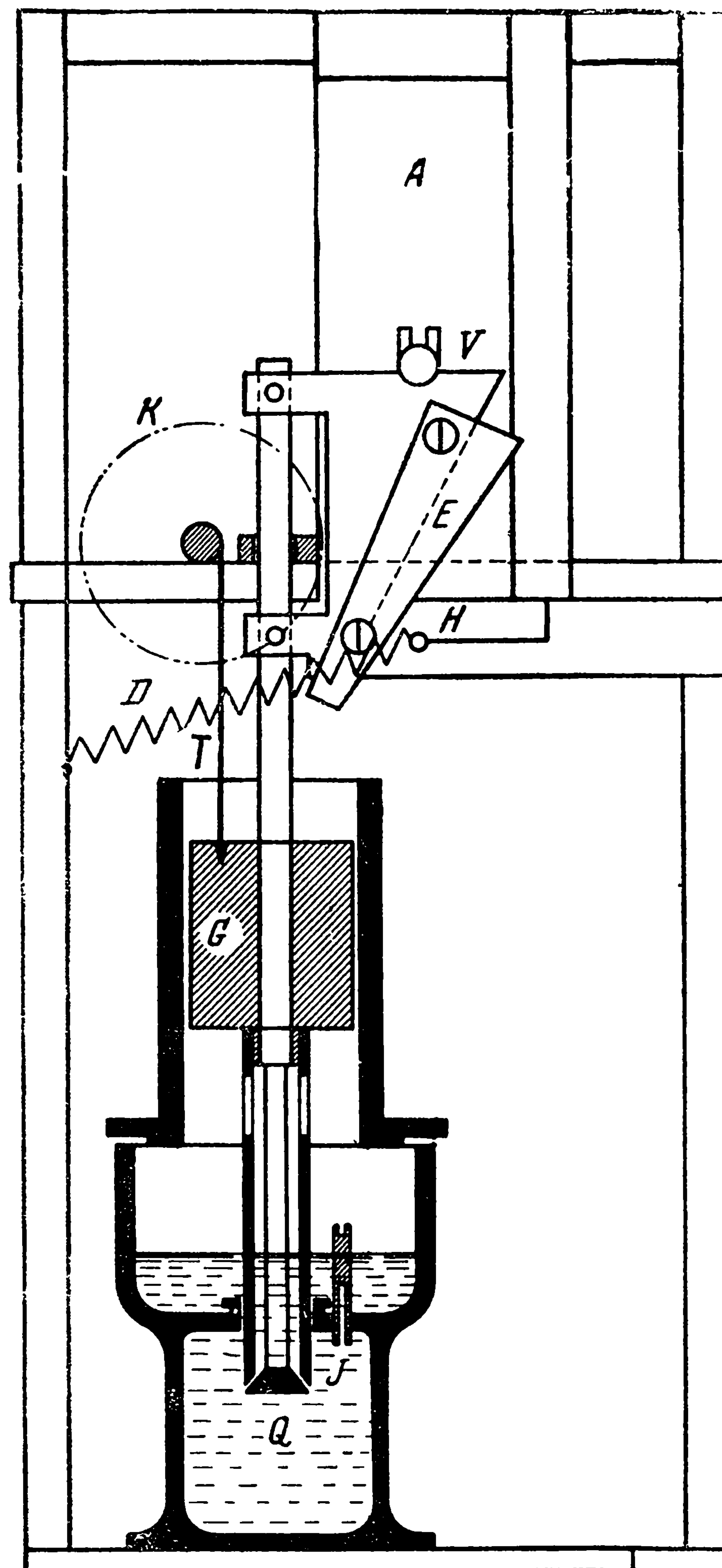


Рис. 3.

спектра, необходимо при исследовании этих последних ослаблять свет, падающий на щель *M* с помощью вращающегося спектра. Вдвигание этого приспособления перед щелью *M* я предполагал сделать автоматически свя-

занным с движением пластинки A по тому же принципу, как это сделано для движения призмы P_2 (это приспособление не было еще выполнено).

Наиболее существенной частью прибора является вакуummикрорадиометр [1]. Существенное отличие его от прибора Бойса заключается в том, что подвешенная система находится в пустоте, благодаря чему не только повышается термоэлектрическая чувствительность (как то следует из моих опытов над охлаждением термоэлементов в пустоте), но и уменьшается трение о воздух, что позволяет пользоваться меньшими направляющими силами нити подвеса. Для того чтобы можно было по желанию изменять направляющую силу подвеса и поправлять те сдвижения нуля которые обусловлены неизбежными пара- и диамагнитными действиями на подвешенную термоэлектрическую цепь, я воспользовался примером «диамагнитной астазии», который опробовал уже несколько лет тому назад: на стержень, несущий термоэлектрическую цепь, несколько выше зеркала приклеена маленькая стрелка из висмута, которая помещается между двумя заостренными железными полюсными наконечниками N и S (рис.4), впаянными в латунное тело радиометра. Поднося к этим наконечникам стальные магниты, можно создать такое поле, при котором висмутовая стрелка, отталкиваясь от наконечников, будет заметно противодействовать направляющей силе кварцевой нити подвеса. Чтобы изменять по желанию положение нуля, служат два других полюсных наконечника N' и S', при помощи которых можно задавать «поправляющее» неравномерное магнитное поле.

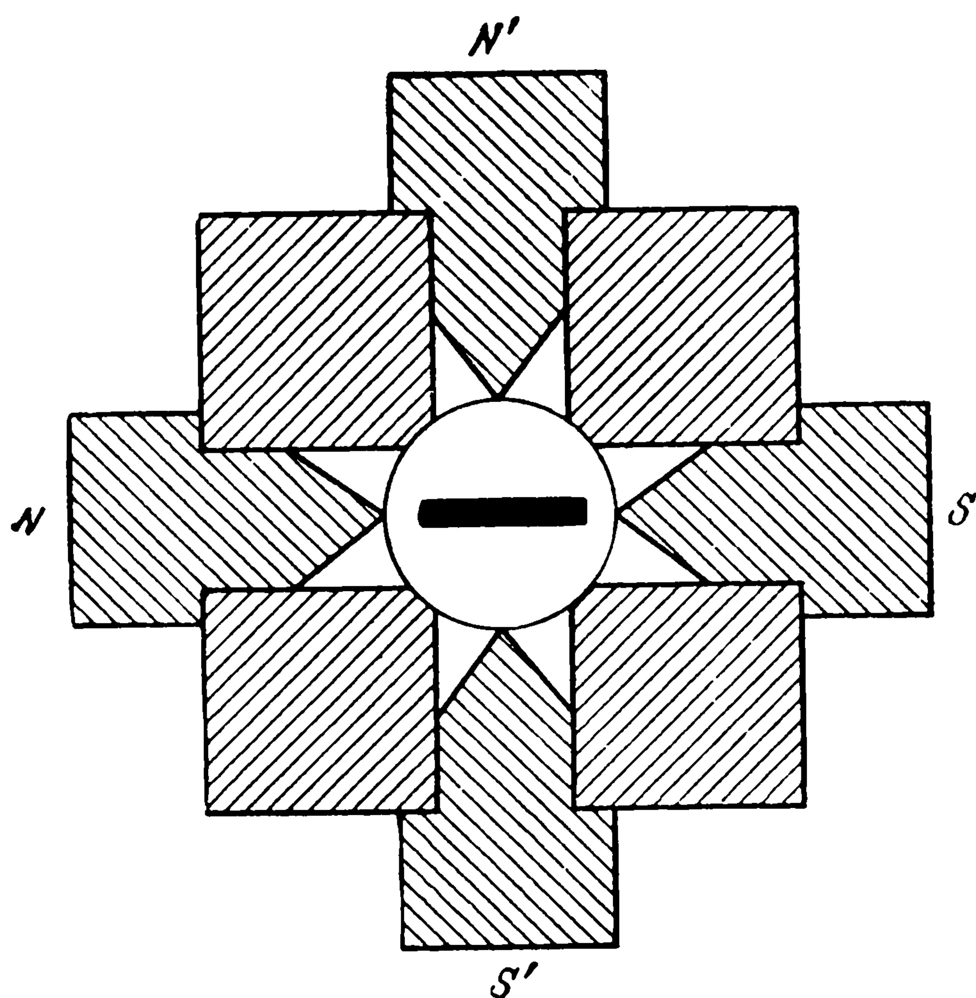


Рис. 4.

В то же латунное тело радиометра ниже зеркала впаяны два больших плоских железных полюсных наконечника. Между ними висит термоэлектрическая цепь, а поле задается большим подковообразным магнитом, который можно удалять или приближать к этим полюсным наконечникам.

Описанное устройство радиометра позволяет в приборе, предварительно выкачанном шпренгелевским насосом, задавать подвижной системе

---

[1] За последнее время Рубенс [1] для своих работ пользуется микрорадиометром, помещенным под колоколом воздушного насоса.

любой период, поправлять ее нулевую точку и подбирать такую силу магнитного поля для термоэлектрической цепи, при которой вся системе колебалась бы почти апериодически.

Первую работу с этим прибором (спектр поглощения жидкостей и их паров в связи с законом Ангстрема) я предложил сделать К. П. Яковлеву [2], который потратил много труда на выполнение некоторых деталей прибора и на приведение прибора в действие. Им были построены также весьма легкие термоэлектрические цепи из проволок в $d = 0{,}025$ *мм* (серебро и констан) и выработан особый прием эти проволоки спаивать в стык.

Подготовление прибора к работе затянулось, к сожалению, на долгое время, так как при пользовании вакуумикрорадиометром возникла очень большая техническая трудность; отсутствие трения о воздух, столь выгодное для чувствительности прибора, делает его крайне чувствительным и к сотрясениям здания, так как мелкие маятникообразные колебания подвешенной системы около ее точки привеса и около ее центра тяжести затухают крайне медленно и дают фотографическую кривую с ясно выраженными зазубринами. По моему предложению, К. П. Яковлев пробовал уменьшить чувствительность прибора к сотрясениям, подкладывая под головку, несущую нить подвеса, слой ваты или помещая ее на особого устройства короткий трехэтажный пружинный подвес, но старания в этом направлении до настоящего времени не привели к желаемым результатам, и полная чувствительность прибора может быть использована только в помещениях, которые не страдают от сотрясений.

В настоящее время лаборатория научных исследований по физике при Московском университете закрыта. Вот почему я счел нужным дать изложенное выше описание спектрографа, несмотря на то что прибор еще не является окончательно выработанным.

44. УСПЕХИ ФИЗИКИ В 1911 ГОДУ

Наибольший интерес и наибольшее число работ по физике сосредоточили на себе в истекшем году вопросы, которые связаны с исследованием строения материи из атомов положительного и отрицательного электричества: работы, сюда относящиеся, охватывают как оптические свойства материи, так и изучение самопроизвольного распада вещества (радиоактивные явления) и разложения материи на ее составные электрические части внешними силами (ионизация светом и электрическими разрядами). Как очень интересную работу в этой области можно отметить исследование лучей положительного электричества, сделанную сэром Джозефом Томсоном. Известно, что при электрических разрядах в разреженных газах возникает поток отрицательных электронов — катодные лучи — и в направлении, противоположном катодным лучам, начинают двигаться те молекулы и атомы газа, от которых электрическими силами были оторваны электроны катодного пучка; этот поток молекул — эти лучи положительного электричества — легко обнаружить, если катодный электрод сделать в форме сита, тогда в одну сторону (в сторону анода) пойдут катодные лучи, а в противоположную — через отверстия сита — устремятся лучи положительного электричества. Около двадцати лет тому назад Томсон исследовал катодные лучи и показал, что отрицательные электроны, их образующие, во всех случаях имеют одинаковые массы, независимо от того, из атомов какого газа они образовались, и что масса каждого электрона приблизительно в две тысячи раз меньше массы атома водорода. Вскоре после этого Вилли Вину [1] (которому в истекшем году была присуждена премия Нобеля по физике) удалось измерить массы частиц, составляющих лучи положительного электричества: по его измерениям, эти массы оказались приблизительно равными массам атомов тех газов, в которых они возникали. При ближайшем изучении этого вопроса оказалось, однако, что явления, связанные с движением лучей положительного электричества, настолько сложны, что только после пятнадцати лет

напряженной работы, после очень большого числа отдельных исследований, — за это время их появилось более сотни, — Томсону, наконец, удалось отыскать те условия, при которых измерения этих масс уже не возбуждали сомнения. Томсон подтвердил результаты Вина, но нашел, что от атомов газов отщепляется не по одному электрону (как полагал Вин, а что в луче несутся атомы, от которых отщеплены и один, и два, и три, и больше электронов и даже есть атомы, в которых имеется по одному лишнему электрону, т. е. атомы, которые в пучке лучей положительного электричества несут свободные отрицательные заряды; описывая свой способ измерения атомных масс, Томсон указывает и на совершенно сказочную чувствительность его: достаточно одной сотой доли миллиграмма вещества, чтобы без труда определить его атомный вес с точностью до одного процента и притом получить эту величину и в том случае, когда вещество имеется не в чистом виде, а составляет только часть сложной смеси. В приложении к исследованию продуктов радиоактивного распада этот новый метод Томсона обещает дать очень интересные результаты.

В области термодинамики истекший год принес блестящее подтверждение третьего принципа термодинамики, «принципа Нернста» который позволяет характеризовать свойства твердых тел вблизи абсолютного нуля температуры. Как на одно из следствий своего принципа Нернст указал на то, что удельная теплота твердых тел должна зависеть от температуры, что закон Дюлонга и Пти относительно атомной теплоемкости должен нарушаться при низких температурах, так как с приближением к абсолютному нулю температуры самая величина теплоемкости, постепенно уменьшаясь, должна делаться ничтожно малой. Чтобы проверить это следствие третьего принципа, Нернст предпринял экспериментальное исследование зависимости теплоемкости от температуры для большого числа твердых тел, постепенно спускаясь от комнатной температуры (300° K) до температуры жидкого воздуха (70° K) и жидкого водорода (20° K); опыт показал, что, действительно, во всех случаях без исключения при очень низких температурах теплоемкость тел делается ничтожно малой. Мы можем считать теперь, что принцип Нернста экспериментально обоснован и его широкое приложение для создания термодинамики твердого тела вне сомнения.

При очень низких температурах не только теплоемкость, но и электрические и оптические свойства материи принимают совершенно неожиданные особенности, изучение которых позволит нам ближе подойти к электронному строению вещества. Но все эти работы при низких температурах требуют огромных вспомогательных средств, и даже в богатом Берлинском институте Нернст не имел средств идти ниже 20° K — температуры, которую дает жидкий водород. К еще более низким температурам, которые лежат всего на два градуса выше абсолютного нуля температуры, в истекшем году удалось подойти Камерлинг-Оннесу [2] в Криогенной лаборатории Лейденского университета, богатые средства которой позво-

лили построить криостат с кипящим жидким гелием. Лейденская лаборатория имеет большую машинную станцию, превосходно оборудованную машинами для добывания жидкого воздуха и жидкого водорода, в ней уже в течение многих лет ведутся систематические исследования свойств тел при очень низких температурах, между которыми находится и исследование свойств гелия, которое привело к возможности построить новый криостат; теперь, когда средства лаборатории позволяют еще гораздо ближе подойти к абсолютному нулю температуры, мы в праве ожидать в ближайшем будущем новых очень важных исследований.

В области оптики за истекший год следует отметить работы Рубенса по исследованию волн, даваемых накаленным паром ртути; занимаясь в течение более двадцати лет изучением волн теплового спектра, Рубенс шаг за шагом переходил все к более длинным волнам, изучал свойства их и способы их получения, построил очень чувствительный микрорадиометр, нашел приемы, которые позволяют изолировать и измерять эти длинные волны. Волны, даваемые накаленными ртутными парами, оказались в шестьсот раз длиннее волн видимого зеленого света, их длина более трех десятых долей миллиметра, и по отношению к металлическим решеткам они ведут себя совершенно так же, как и электромагнитные волны Герца: волны Рубенса [1] стоят ближе к известным в настоящее время коротким волнам Герца, чем к волнам видимого света; от последних их отделяют $9\frac{1}{2}$ октав волн теплового спектра, а от первых они отделены интервалом, меньшим, чем четыре октавы.

Наконец, можно еще отметить, что в истекшем году вопрос о движении Земли относительно эфира, который со времени первых опытов Физо [1] уже более семидесяти лет занимает физиков, видимо, получил окончательное решение: все попытки непосредственно констатировать это относительное движение не дали положительных результатов и в последние годы повели к предположению, что задача эта никогда не будет решена, что решение ее принципиально невозможно; это предположение получило название «принципа относительности» и ставило обратную задачу: указать во всех рассуждениях те условия, благодаря которым равномерное движение материи относительно эфира не может быть обнаружено никакими способами. Если раньше электродинамика подсказывала те приемы, которыми можно было бы попытаться обнаружить движение Земли в эфире, то теперь принцип относительности потребовал таких дополнений в электродинамике, благодаря которым все явления, захватывающие материю (а только эти явления мы и можем наблюдать), совершаются независимо от ее движения в эфире, — мы не можем говорить, следовательно, только об относительном движении масс друг относительно друга, а тогда эфир и его свойства, да и самая гипотеза о существовании эфира в той форме, как она понималась до настоящего времени, является уже лишней и ненужной.

Выше приведены несколько отдельных работ, которые характеризуют успехи физики в разных областях, но они, конечно, не могут дать картины общего движения науки в истекшем году; как видно из приведенных примеров, успехи в узкой области специальных вопросов появляются не сразу, не случайно, а подготовляются в течение долгих лет упорной работой многих исследователей.

В заключение интересно еще указать и общее количество исследований по чистой физике (не считая работ, относящихся к приложению физики к технике, к метеорологии и к астрономии), которые были опубликованы в истекшем году во всех странах света; такой подсчет можно сделать по справочнику физической литературы, который издается Германским физическим обществом: он показывает, что число этих специальных работ, сделанных в сотне разных лабораторй, превышает четыре с половиной тысячи.

Значение исследований по чистой физике для всех отраслей нашего знания и техники с каждым годом встречает все больше и больше признания, государства и частные лица идут на помощь исследователям: в истекшем году основалось новое научное общество имени императора Вильгельма, которое для вышеуказанной цели собрало уже огромные средства и в ближайшем будущем открывает свои действия.

45. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

УЧЕНИЕ О СВЕТОВОМ ДАВЛЕНИИ ДО МАСКВЕЛЛА

Предположение, что лучи света производят давление на те тела, на которые они падают, и стремятся двигать эти тела в направлении распространения света — это предположение было впервые высказано Кеплером [1] как такая гипотеза, которая просто объясняет характерные свойства кометных хвостов.

Представление Кеплера о происхождении кометных хвостов и его гипотеза о существовании светового давления скоро стали всеобщим достоянием; в астрономических трактатах XVII века, например, в «Датской Астрономии» Лонгмонтануса, они считаются в числе элементов науки.

Что падающие лучи света должны производить давление, вытекало непосредственно и из «эмиссионной теории света». Еще задолго до Кеплера в тогдашней науке установился взгляд, что световое излучение представляет собою испускание «световых частичек», которые прямолинейно несутся от светящегося тела в разные тела, производят на них давление; таким образом, гипотеза Кеплера о давлении света получала теоретическое обоснование в тех представлениях о природе света, которые не только в то время, но и долгое время спустя — до начала XIX века — считались основами физики.

Относительно абсолютных величин давления, которое производят, например, лучи солнца, предположения расходились очень далеко. В своей интересной книге «О северных сияниях» де Меран [2] между прочим приводит, что некий Гартзокер [1] (в 1696 г.) указывает, что «путешественники утверждают, что течение вод Дуная значительно медленнее, когда лучи Солнца противодействуют его движению (утром), и делается более бы-

[1] Joh. K e p l e r i. «De Cometis». Libellus secundus. Augusta Vindelicorum. 1619. Opera omnia. Edit. Frisch., 7, p. 110. Francforti a/M, 1867.

[2] D e M a i r a n. Traité physique et historique de L'aurore Boréale. 11 Ed. Paris, p. 368, 1754.

стрым после полудня, когда лучи солнца помогают его течению». Но еще долгое время после того, как Кеплер высказал предположение о существовании светового давления, никто не пытался проверить это предположение непосредственным опытом, и только в XVIII веке были сделаны попытки в этом направлении, между которыми попытку Гомберга [1] [2], может быть, следует признать первым опытным исследованием светового давления: Гомберг при помощи зажигательного стекла собирал лучи Солнца на маленьком листочке асбеста, ожидая, что «световые частички» выбросят асбест из фокуса чечевицы, но этого явления, конечно, не увидал.

В течение XVIII века интерес к опытным исследованиям и искусство экспериментирования сделали огромные успехи — вопросы об экспериментальном исследовании светового давления, естественно, привлекли к себе внимание. Вот как описывает де Меран [2] те опыты, которые он делал вместе со знаменитым физиком Дюфэ: «Горизонтальное железное колесико приблизительно трех дюймов в диаметре имеет шесть спиц, на концах которых прикреплены легкие вертикальные крылышки: ось колесика — железная и своим верхним заостренным концом прилипает к концу намагниченной железной полосы. Все колесико вместе с осью весит 30 гранов (2 *мг*). Оно в высшей степени подвижно, и вместе с тем оно позволяет уверенно делать наблюдения над предполагаемым давлением световых лучей. Весь прибор вращается в ту или в другую сторону в зависимости от того, как сдвигают фокусы линзы относительно отдельных крылышек. Отсюда можно было заключить, что световые лучи притягивают и отталкивают в разных точках светового конуса, образуемого линзою, но расширение воздуха, сразу и притом неравномерно нагретого, как мне сдается, представляет собою причину, вполне достаточную для объяснения наблюдаемых движений».

Если иметь в виду, что еще за пятьдесят лет до опытов де Мерана приходилось для доказательства существования светового давления ссылаться на свидетельство путешественников по берегам Дуная, то эти опыты де Мерана и Дюфэ заслуживают нашего особенного удивления и по изяществу того приема, которым экспериментаторы воспользовались для получения очень подвижной системы (магнитный подвес) и по тому отсутствию предвзятой мысли, с которым де Меран разбирает отрицательный результат этих опытов, хотя сам он и впоследствии продолжает верить. что световое давление должно существовать, как того требовали и наблюдения кривизны кометных хвостов и эмиссионная теория света.

В то время, когда де Меран и Дюфэ пытались непосредственно обнаружить световое давление, Эйлер [3] подошел к этому вопросу теоретически: как убежденный противник ньютоновской эмиссионной теории света, Эйлер видел, что то простое механическое обоснование световому давлению,

[1] Homberg. Histoire de L'Acad. des Sciences de Paris, p. 21, 1708.
[2] См. де Mairan, p. 371.
[3] L. Euler. Histoire de L'Academie Royale de Berlin 2, p. 117.

которое дается эмиссионною теориею, по существу, недопустимо а, с другой стороны, явление отталкивания кометных хвостов Солнцем требовало какого-нибудь объяснения: Эйлер, становясь на точку зрения Гюйгенса и рассматривая движения в световом луче как продольные колебания, по характеру сходные со звуковыми, говорит: «Частички, колебания которых обусловливают явление света, не удаляются заметно от положения своего равновесия, хотя и существует весьма малое пространство, в котором они колеблются; и эти колебания достаточны, чтобы немного сдвигать те тела, которые они толкают; так как эти сдвигания повторяются беспрерывно, то в результате получается, что толкаемая частица начинает перемещаться заметным образом».

В начале XIX века вопрос о существовании светового давления как задача, подлежащая непосредственному опытному исследованию, был еще раз выдвинут Френелем [1]: на легкие крылышки, прикрепленные к концам подвижной магнитной стрелки, он направлял пучки солнечного света, но так же, как и де Меран, мог констатировать только движения, вызываемые конвекцией неравномерно нагретого воздуха. Описывая эти опыты, не давшие положительных результатов, Френель каких-либо соображений относительно существования или невозможности светового давления не высказал.

После указанных опытов Френеля вопрос об исследовании светового давления постепенно исчез из числа насущных научных задач: для объяснения искривления хвостов Ольберс предложил электрическую теорию, которая на долгие годы стала господствующей в астрофизике и постепенно заставила забыть теорию Кеплера, а во всех тех бесконечно разнообразных оптических исследованиях, которые были вызваны работами Френеля и более полустолетия сосредоточивали на себе внимание физиков, световое давление, по существу, никакой роли не играло; поэтому и вопрос о его существовании постепенно был забыт. После перерыва в пятьдесят лет вопрос о световом давлении снова привлек к себе внимание, когда Крукс (1870) опубликовал ряд своих изумительных радиометрических опытов: сложность и неожиданность многих явлений и трудность подсчета их заставили искать объяснения в разных причинах: и в тепловых эффектах луча, и в непосредственном действии света на тела, и т. д.

Что непосредственное действие света на тела должно существовать, ясно и определенно было высказано Максвеллом (1873): он показал, что его электромагнитная теория света приводит к необходимости существования светового давления, причем он впервые указал, как можно определить абсолютную величину этого давления, зная яркость луча, и попутно указал, что, по сравнению с радиометрическими силами в опытах Крукса, непосредственное пондеромоторное действие света исчезающе мало по своей величине. Независимо от Максвелла, совершенно иным, термоди-

[1] A. Fresnel. Ann. de chim. et de phys., (2) 29, p. 57, 107, 1825.

намическим путем Бартоли (1876), сам занимавшийся опытными исследованиями по радиометрии, выяснил вопрос о давлении света.

Теоретические соображения Максвелла и Бартоли дали новый толчок к изучению явлений, связанных со световым давлением.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

Обоснование Максвелла

В своем трактате Максвелл, излагая основы электромагнитной теории света, впервые указал, что прямым следствием этой теории является утверждение, что лучи света производят давление в направлении их распространения, и он указал, что между яркостью луча и его давлением существует определенное количественное соотношение.

Для простейшего случая линейнополяризационного, монохроматического пучка взаимнопараллельных лучей в чистом эфире рассуждения Максвелла сводятся к следующим положениям.

Если плоскость поляризации электрической слагающей светового луча совпадает с определенной плоскостью (плоскостью чертежа), то в определенный момент электрическая поляризация e распределяется в пространстве так, как это показано на рис. 1, здесь направление электрической

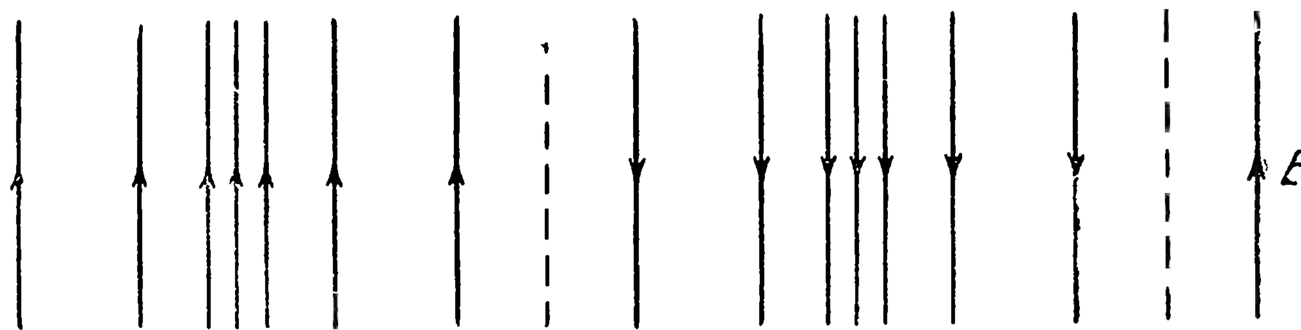


Рис. 1.

поляризации указано стрелками, а величина этой поляризации — числом «электрических силовых линий Фарадея», которыми пронизывается единица площади эфира в данной точке. Распределение этой электрической поляризации не неподвижно в эфире, а двигается в направлении распространения луча со скоростью света.

Линии сил магнитной поляризации m в изображенном световом пучке перпендикулярны плоскости чертежа и распределены совершенно одинаково с линиями электрической поляризации. Для данного элементарного объема эфира смены электрической e и магнитной m поляризации во времени мы можем выразить так:

$$e = E \cos at,$$

$$m = M \cos at,$$

где E максимальная электрическая, а M максимальная магнитная поляризация.

Запас механической энергии $Э$ в данном элементарном объеме τ эфира пропорционален квадрату электрической и квадрату магнитной поляризаций его:

$$Э = \frac{1}{8\pi}(E^2 \cos^2 at + M^2 \cos^2 at)\,\tau,$$

и, как то следует из основных уравнений электромагнитных колебаний, энергия луча наполовину состоит из энергии электрической поляризации и наполовину из энергии магнитной поляризации эфира:

$$\frac{E^2}{8\pi} = \frac{M^2}{8\pi} = p.$$

Чтобы объяснить, как возникает световое давление, Максвелл пользуется основным свойством силовых линий Фарадея: это свойство заключается в том, что в направлении действия этих сил поляризованная среда испытывает натяжение, а в плоскости, перпендикулярной к этому направлению линии сил, отталкиваясь друг от друга и стремясь распространиться в среде, производят механическое давление друг на друга и на поверхности, ограничивающие среду.

В § 792 своего «Трактата об электричестве и магнетизме» Максвелл говорит следующее:

«Величина p представляет собою числовое значение половины всей энергии в единице объема, которая находится в нем как энергия электрической поляризации и как энергия магнитной поляризации среды.

Вследствие существования магнитной энергии (как то указано в § 643 «Трактата») в направлении магнитных сил возникает натяжение, величина которого равна p, а в направлении, перпендикулярном к ним, давление, имеющее ту же величину p.

Совместное действие электрической и магнитной поляризации выражается в форме давления, действующего в направлении распространения волны; величина его равна $2p$.

«В свою очередь, $2p$ представляют собою полную энергию луча в единице объема, а поэтому в среде, в которой распространяются волны [1], в направлении их распространения возникают силы давления, которые в каждой точке пространства численно равны величине энергии в каждой единице объема».

---

[1] Максвелл обобщает вывод, сделанный им выше для случая поляризованного пучка монохроматического света, на общий случай естественного света, так как силы давления пропорциональны квадратам величины электрической и магнитной поляризации и при суперпозиции этих величин величины давлений суммируются.

Результат, указанный Максвеллом для пучка параллельных лучей, можно написать и в такой форме: обозначим через E количество энергии падающей нормально на плоское зеркало в одну секунду в форме пучка параллельных лучей, через v — скорость света в среде, окружающей пластинку, через ρ — коэффициент отражения поверхности; тогда величина светового давления p будет

$$p = \frac{E}{v}(1 + \rho).$$

Отсюда следует, что свет давит на зеркальную поверхность, вполне отражающую свет ($\rho = 1$), с силой, в два раза большей, чем на черную поверхность, вполне поглощающую световые лучи.

Максвелл воспользовался найденным им соотношением между энергией луча и величиной производимого им давления, чтобы определить величину давления солнечного света на черную поверхность.

В § 793 своего «Трактата» он говорит: «Если положить, что в ясную погоду солнечный свет, поглощаемый одним квадратным метром, дает 123,1 килограммометра энергии в секунду, то на эту поверхность он давит в направлении своего падения с силою в 0,41 миллиграмма».

Доказательство Бартоли

Совершенно не касаясь механизма световых колебаний, Бартоли показал, что рассуждения, которые сводятся ко второму принципу термодинамики, приводят к альтернативе: или признать существование светового давления, или отказаться от второго принципа термодинамики.

Рассуждения Бартоли были следующие [1]:

Представим себе цилиндр рис. 2 из вполне отражающего вещества с двумя поршнями из такого же вещества, A и B. Эти поршни имеют заслонки C и D, которые могут открываться и таким образом сообщать между собою пространства между поршнями. Основания цилиндра M и N вполне проницаемые для тепла, находятся в соприкосновении с двумя источниками тепла P и Q, причем температура P пусть будет больше Q. Цилиндры внутри совершенно не содержит вещества. Если мы отодвинем поршни A и B на некоторое расстояние от P и Q, то в пустое пространство под поршнем будет переходить радиация от тел P и Q до тех пор, пока плотность энергии не достигнет такой величины, когда радиация и излучающее тело будут находиться в равновесии между собой. Плотность энергии, понятно, будет больше в том пространстве, которое соприкасается с телом более высокой температуры.

[1] Начиная со слов: «Рассуждения Бартоли были следующие» и до конца параграфа П. Н. Лебедевым сделан пропуск, заполненный П. П. Лазаревым.

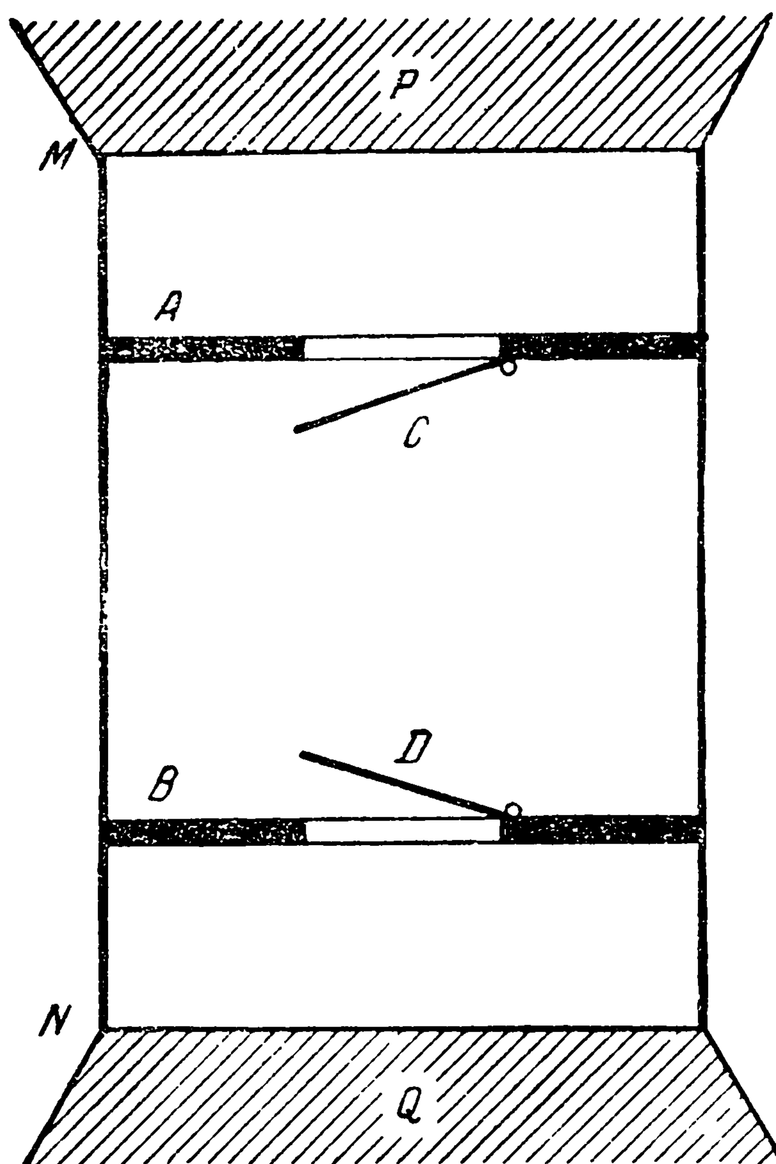


Рис. 2.

Сделаем теперь такой воображаемый опыт с нашим прибором: откроем заслонку D и пустим радиацию более холодного тела Q в пространство AB. Это пространство через некоторое время наполнится радиацией, имеющей плотность, соответствующую температуре тела Q. Если после этого мы, закрыв заслонку D, начнем двигать поршень B, то лучистая энергия в пространстве AB, заключенная во вполне отражающие стенки, будет все время оставаться в этой камере в неизменном количестве, и так как объем пространства уменьшается, то плотность энергии при таком сжатии будет возрастать. Мы можем сжатие сделать настолько большим, что плотность энергии в пространстве AB будет больше, чем плотность энергии под поршнем A. Если мы достигнем этого момента, то, открыв заслонку C, можно заставить переходить сжатую радиацию из объема AB под поршень A в тело P, которое при этом будет нагреваться.

В результате опыта, который проведен в пустоте, получается таким образом переход тепла от холодного тела к теплому P, что представляется невозможным без затраты работы, а следовательно, при таком сжатии радиации эта последняя должна давить на поршень и это давление вызывает при перемещении B затрату той работы, вследствие которой происходит перенос тепла [1].

ОПЫТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ СВЕТА НА ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

После тех первых попыток непосредственно измерить давление света которые были предприняты Гомбергом (1708), де-Мераном (1754) и Френелем (1823), когда порядок величины ожидаемого давления и встречающихся в опыте пертурбирующих причин были еще совершенно неизвестны, задача экспериментального исследования светового давления, после обнародования работ Максвелла и Бартоли, была поставлена в гораздо более благоприятные условия: во-первых, как электромагнитная теория

[1] Теоретическое истолкование давления света было также сделано в чрезвычайно изящной форме Лармором, причем его формулы для давления, выведенные из чисто механических соотношений, приводят к тем же соотношениям, как и исследования Максвелла.

света, так и термодинамические соображения давали возможность вперед вычислить абсолютную величину того давления, которое при данном источнике света экспериментатор мог ожидать в своих опытах, что позволяло ему строить измерительные приборы необходимой и достаточной чувствительности; во-вторых, работы Крукса предостерегали от тех опасностей, которые были сопряжены с радиометрическими эффектами, и, наконец, в-третьих, экспериментальные средства даже в скромно-обставленных лабораториях (электрический фонарь) и ртутный насос давали возможность приступить к исследованию светового давления.

Как указывалось выше, Максвелл сам впервые вычислил абсолютную величину светового давления.

Так как давление действует только на ту поверхность тела, которая обращена к источнику света, то самое тело должно как бы отталкиваться лучами в направлении их распространения.

Исходя из своих термодинамических соображений, Бартоли [1], независимо от Максвелла и, очевидно, не зная полученных им результатов, вычислил, что «давление солнечных лучей, нормально падающих на плоскую зеркальную поверхность, составляет 0,84 миллиграмма на каждый квадратный метр поверхности».

Вычисления Максвелла, сделанные им для вполне поглощающей поверхности, дали бы для случая нормального падения солнечных лучей на зеркало давление в $2 \times 0{,}41 = 0{,}82$ *мг*, т. е. величину, совпадающую с вычислениями Бартоли.

Если для исследования светового давления брать небольшие источники света (вольтову дугу) и пользоваться небольшими крылышками, то надо иметь в виду, что абсолютные величины ожидаемых давлений будут в десятки тысяч раз меньше тех, которые Максвел и Бартоли вычислили для одного квадратного метра. Но всякий, кто работал с крутильными весами, знает, что еще гораздо меньшие силы можно измерять при их помощи и что, следовательно, построить прибор, достаточно чувствительный для измерения вычисленного светового давления, не представляло каких-либо затруднений.

Затруднения в исследовании светового давления возникают не со стороны чувствительности приборов, а со стороны тех добавочных «радиометрических» сил Крукса, которые, налагаясь на эффекты светового давления, могут препятствовать его измерению. На то, как велики могут быть эти пертурбирующие силы, указал впервые Цельнер [2], который как астрофизик, интересовался экспериментальным обоснованием светового давления; подсчитывая то световое давление, которое в одном из опытов Крукса лучи лампы производили на подвижное крылышко радиометра, Цельнер указал на то, что «величина давления, вычисляемая по Максвел-

---

[1] A. Bartoli. Exner's Rep. d. Phys., **21**, p. 203, 1885.
[2] F. Zöllner. Pogg. Ann., **160**, p. 155, 1877.

лу, в этом случае была в 100 000 раз меньше того радиометрического эффекта, который наблюдал Крукс».

Экспериментальная задача, которую приходилось разрешить, состояла в том, чтобы найти такие условия опыта, при которых радиометрические эффекты были бы настолько малы, чтобы они не превосходили небольшой доли светового давления, и тогда делать опыты с двумя крылышками, у которых радиометрические эффекты имеют заведомо различные величины и находятся в заранее известном отношении; тогда из таких двух наблюдений можно определить величину пертурбирующего эффекта и величину светового давления.

Когда я решился приступить к опытному исследованию светового давления [1], то вопрос, возможно ли вообще обойти пертурбирующее действие радиометрических сил, представлялся вопросом открытым: если радиометрические силы при известных условиях были в тысячу раз больше сил светового давления, то надо было найти такие условия, в которых эти радиометрические силы были бы в десятки тысяч раз меньше, чем в опытах Крукса и тогда только приступать к исследованию светового давления с расчетом на успех.

Прежде нежели найти окончательную форму измерений, я в течение нескольких лет подготовлял их, изучая лабораторными опытами сложный комплекс явлений, который носит общее название «радиометрических» (кинетической теории этих явлений нет и до настоящего времени). Теперь, спустя много лет после того, как прямой путь исследования уже найден, вся эта длинная, кропотливая, предварительная работа кажется лишней но я думаю, что без основательного знания тех не всегда легко объяснимых радиометрических явлений, с которыми пришлось познакомиться, я не пошел бы по тому прямому пути, по которому шел в окончательных опытах. Этот путь был указан самим Максвеллом, который в своем «Трактате об электричестве и магнетизме» в § 793 говорит:

«Концентрированный электрический свет, вероятно, будет производить большее давление, чем свет Солнца и не представляется невозможным, что лучи такого света, если их направить на тонкий металлический легко подвижный листочек, подвешенный в пустоте, будут производить на него заметный механический эффект».

Опыт был расположен следующим образом [2]: в большом стеклянном баллоне ($D = 20$ *см*) на тонкой стеклянной крутильной нити был подвешен стеклянный стержень H (см. рис. 1 к ст. 15), на котором укреплены две пары крылышек из платиновой жести P_1 и P_2. Каждая пара крылышек

---

[1] П. Н. Лебедев. ЖРФХО (часть физ.), **33**(1), стр. 53, 1901; подробнее в Ann. d. Phys., **6**, p. 433, 1901. Там же указана и вся литература.

[2] Начиная со слов: «Опыт был расположен следующим образом» на месте пропуска, оставленного П. Н. Лебедевым, вставлено описание опытов из статьи: «Максвелло-бартолиевы силы давления лучистой энергии» (ЖРФХО, часть физ., **32**, стр. 211—217, 1900.

состояла из двух кружков (диаметром 5 *мм*), центры которых находились на расстоянии 10 *мм* от оси вращения. Один из кружков каждой пары был металлически блестящий с двух сторон; другие два были электролитически покрыты платиновой чернью — также каждый с двух сторон. Обе пары крылышек разнились только толщиной жести (0,10 и 0,02 *мм*); более толстое подвергалось в пять раз более долгому платинированию.

Стеклянный стержень был снабжен зеркалом *M* для наблюдения, трубкой и шкалой угла кручения нити.

Для того чтобы исключить пертурбирующие силы переноса (конвекции) газа, которые зависят от разницы температур крылышка и стеклянного баллона и не зависят от направления пучка света, нагревающего крылышко, было принято следующее расположение опыта (см. рис. 2 к ст. 15; план): свет дуговой лампы *S* (30 *a*) можно было направить на ту или другую сторону крылышка при помощи системы зеркал и линз простым передвижением двойного зеркала *M*; разница отклонений в этих двух случаях не зависит от конвекции.

Для уменьшения пертурбирующих радиометрических действий опыт был поставлен в такие условия, чтобы эти силы были по возможности малы: диаметр стеклянного баллона был достаточно велик ($D = 20$ *см*) и крылышки были сделаны из плоского платинового листа, для того чтобы избежать влияния кривизны поверхности. Действие радиометрических сил, которое обусловлено разницей температур двух поверхностей освещаемого кружка, может быть исключено простым подсчетом, который основывается на сравнении отклонений, даваемых крылышком толстым (0,10 *мм*) и крылышком тонким (0,02 *мм*); разница температур и, следовательно, величины радиометрических сил в первом случае в пять раз больше, чем во втором; отсюда мы можем вычислить на основании полученных отсчетов, как велико было бы отклонение для бесконечно тонкого крылышка, для которого радиометрическое действие равняется нулю.

Для того чтобы сделать наблюдения возможными, необходимо уменьшить как конвекционные, так и радиометрические силы, достигая возможно большего разрежения при помощи насоса Sprengel'я разрежение можно было считать достаточным, если на тонкое зеркальное крылышко световой пучок давил сильнее, чем на тонкое зачерненное (действие в направлении, противоположном радиометрическим силам).

Опыты показывают, что, помимо конвекционных и радоиметрических сил, существуют еще силы давления, которые производит пучок падающего света на крылышки, и что эти силы (почти в два раза) больше для отражающих крылышек, чем для поглощающих.

Чтобы узнать, в каком отношении находятся найденные силы к силам давления лучистой энергии — к силам Maxwell — Bartoli, — необходимо было измерить в абсолютных единицах отношение между энергией падающих лучей и величиной вызванного ею давления.

Количество падающей лучистой энергии было измерено следующим образом: стеклянный баллон с крылышками был удален, и на то место, где находился освещенный кружок крылышка, помещалась круглая диафрагма D (см. рис. 3 к ст. 15), отверстие которой было равно размеру кружка; лучи дуговой лампы, прошедшие через эту диафрагму, падали на поглощающую их зачерненную поверхность маленького калориметра; кусок меди C (30 *г*) снабжен калориметрическим термометром F, шарик которого находится в углублении, наполненном ртутью.

Механические силы, действующие на крылышко, измеряются углом кручения и расстоянием центра кружка от оси вращения; момент кручения нити измерялся в абсолютных единицах по методу Coulomb'а (наблюдение времени качания, когда к нити подвешено тело, момент инерции которого известен).

Результаты измерений, мною сделанных, можно формулировать таким образом: опыты показывают, что пучок света, падая на отражающие или поглощающие плоские поверхности, производит на них давление, которое в пределах погрешности наблюдений равно световому давлению по Maxwell — Bartoli.

Вскоре после того, как я опубликовал приведенные выше исследования по световому давлению, появилась работа двух американских физиков Никольса и Гулля [1], которые подошли к измерениям светового давления несколько иным и, как мне кажется, недостаточно убедительным путем. Никольс и Гулль ограничили свои исследования изучением механического действия света на стеклянные крылышки, посеребренные с одной стороны, и заставляли падать свет то непосредственно на металлический слой серебра, то на тот же слой со стороны стекла. Радиометрический эффект, даваемый таким крылышком, был очень значителен, так как то тепло, которое поглощалось в серебряной пленке, отдавалось с одной стороны непосредственно окружающему газу, а с другой — через значительную толщину стекла, которое плохо проводит тепло; такое крылышко даже при предельно больших разрежениях дает резко выраженные радиометрические явления и для исследования светового давления непригодно.

Никольс и Гулль в своих опытах стремились избавиться от радиометрических эффектов, воспользовавшись указанием Крукса, что для каждого радиометра в зависимости от индивидуальных особенностей его конструкции можно найти такое давление окружающего воздуха, при котором радиометрический эффект, меняя свой знак, переходит через нуль; для того прибора, которым пользовались Никольс и Гулль, они эмпирически нашли это давление (оно оказалось около $p = 12$ *мм* ртути) и при этом давлении, пользуясь кратковременным освещением крылышка, исследовали механическое действие света на крылышко. Чтобы от измерений направляющей силы подвеса, плеча крылышка, его отклонения и энергии падаю-

[1] A. F. Nichols und G. F. Hull. Ann. d. Phys., **12**, p. 225, 1903.

щего пучка лучей перейти к вычислению светового давления, Никольс и Гулль должны основываться на гипотезе, что и при тех кратковременных освещениях, которыми они пользовались, имеет место то же равновесие радиометрических эффектов, которое наблюдается при стационарном освещении. Пользуясь этой гипотезой, Никольс и Гулль вычисляют из своих наблюдений величины светового давления, которые в пределах одного процента совпадают с Максвелловскими.

Таким образом, исследование Никольса и Гулля, произведенное при наивыгоднейшем давлении в 12 *мм*, можно рассматривать как опытное доказательство существования светового давления, т. е. того непосредственного действия световых волн на твердые тела, которое не требует присутствия газа, только допуская вместе с ними указанную выше гипотезу, которую надо принять на веру, так как нет ни экспериментальных, ни теоретических ее обоснований.

Мне кажется, что было бы правильнее воспользоваться работой Никольса и Гулля для обратного заключения, а именно, допуская существование светового давления, утверждать, что открытый Круксом любопытный переход радиометрических явлений через нуль при определенных давлениях не зависит от продолжительности свечения.

Ряд интересных опытов по давлению света сделал Пойнтинг, исследуя силы, возникающие при наклонном падении света на поглощающие поверхности, при полном внутреннем отражении и при преломлении пучка в прозрачных средах, и, наконец, Пойнтинг попытался измерить те реакционные силы, которые действуют на излучающее тело. Самую главную экспериментальную трудность этих исследований, а именно возникновение добавочных радиометрических сил, Пойнтинг остроумно обходит, в первом случае — располагая опыт так, чтобы радиометрические силы проходили через ось вращения прибора и не могли его поворачивать, во втором — радиометрических сил нет, а в третьем — Пойтинг пользуется очень высоким разрежением.

ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВОЛНУЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ И ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Аналогия, которая существует между световыми, звуковыми и гидродинамическими колебаниями, не ограничивается только кинематической стороной явления, а идет гораздо глубже и захватывает их динамические свойства. Вот почему уже Престон высказал предположение, а лорд Рэлей его обосновал теоретически, что всякое волнообразное движение, распространяющееся в среде с конечной скоростью, производит давление на препятствия, поставленные на пути.

Опытная проверка этого предположения была произведена в Физической лаборатории Московского университета для случая волнующейся жидкой поверхности и для звуковых волн.

Давление волнующейся жидкости на препятствия, задерживающие распространение волн, легко наблюдать, если во время купанья (в ванне или в пруду) ритмическим движением руки возбуждать волны и заставлять их отражаться от плавающего тела (бруска дерева): как только волны дойдут до бруска и начнут от него отражаться, так тотчас же брусок начинает двигаться с заметной скоростью в направлении распространения волн.

Если на поверхности воды плавают мелкие предметы (например, опилки), которые волн не задерживают, то легко видеть, что волны двигают их вверх и вниз, но не увлекают их с собою, и что, следовательно, движение плавающего тела обусловлено только силами падающих на него волн, а не движением самой жидкости.

Для количественной проверки зависимости давления волн от энергии и скорости распространения волн Капцов воспользовался приспособлением, состоявшим из пластинки, на которую падали водяные волны, отклонявшие ее. Пластинка была подвешена на двух нитях, как маятник; из угла ее отклонения было легко определить силу давления. С другой стороны, зная высоту волн и скорость их распространения, можно было вычислить то же давление по формуле лорда Рэлея. Эти опыты, точно так же, как и опыты Альтберга со звуковым давлением показали справедливость общей формулы лорда Рэлея. Метод Альтберга представлял полную аналогию с описанными выше опытами, предпринятыми для обнаружения светового давления на твердые тела. Звук, издаваемый Кундтовской трубкой, падал на пластинку, подвешенную к коромыслу крутильных весов, и его отклонением измерялось давление. С другой стороны, зная интенсивность звука и его скорость, можно было вычислить это давление теоретически. Опыты дали прекрасно согласующийся с теорией результат, и таким образом установлена раз навсегда связь давления с энергией волн и со скоростью их распространения.

ДАВЛЕНИЕ СВЕТА НА ГАЗЫ

Для лучей, поглощаемых газом, газ является абсолютно черным телом, и давление лучей на него обусловлено законом Максвелла; лучи, не поглощаемые газом, на него никакого заметного действия не оказывают. Поэтому, если на газ падает количество световой энергии ε в секунду, а из нее часть α поглощается газом, то давление на газ будет

$$p = \frac{\alpha\varepsilon}{v},$$

где v — скорость света.

Каждая молекула газа испытывает давление, т. е. испытывает силу, стремящуюся двигать ее в направлении луча.

Чтобы обнаружить эту силу, испытуемый газ (ацетилен, углекислота) был заключен в сосуд с вертикальными флуоритовыми стенками рис. 3. Сосуд внутри разделен вертикальной металлической стенкой, не доходящей до флуоритовых окон, так что образуются два связанные друг с другом помещения; если вдоль первого помещения из переднего окошка пропустить горизонтальный пучок света, то газ начнет двигаться по направлению светового пучка и, дойдя до заднего окошка, будет там накопляться и стекать вбок, в соседнее помещение, в котором света нет, в этом помещении газ будет двигаться обратно, чтобы затем снова около переднего окошка втекать сбоку в пучок света в первом помещении.

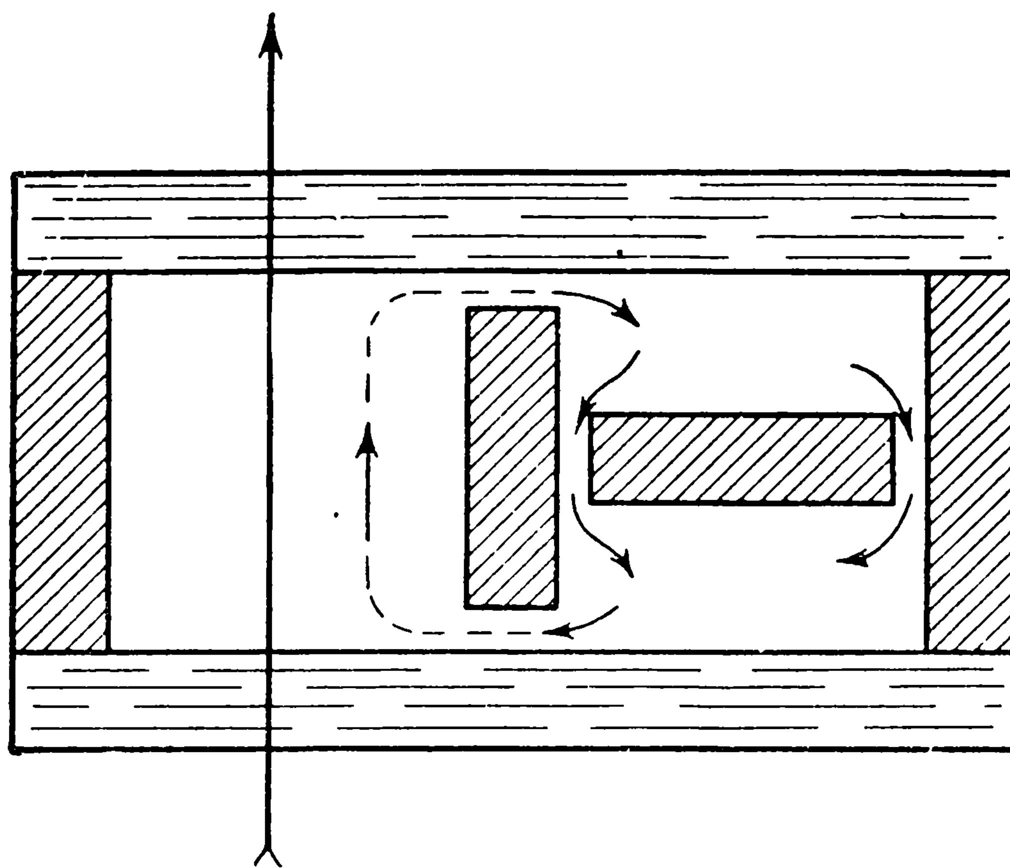


Рис. 3.

Чтобы измерить то давление, которое испытывает газ от проходящих через него лучей, можно поток газа во втором помещении (почти) запереть легким подвижным поршнем, подвешенным к коромыслу крутильных весов, и отклонением этого последнего измерять в абсолютной мере давление, которое испытывает газ в направлении движения света. Измеряя, с другой стороны, энергию E калориметрически и коэффициент абсорбции α при помощи термоэлементов, мы можем проверить указанное выше соотношение.

Сделанные опыты показывают, что непосредственно наблюденное давление и давление, вычисленное из E и α, сходятся вполне в пределах возможных ошибок наблюдений; ввиду очень больших экспериментальных трудностей при измерении газовых давлений — около одной миллионной длины на квадратный сантиметр — возможные ошибки в абсолютных величинах могут доходить до 30%, но и при этих ошибках порядок величины явления установлен вне всякого сомнения [1].

РОЛЬ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ В КОСМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ

Те силы, с которыми действует яркий солнечный свет или концентрированный свет вольтовой дуги на твердые и газообразные тела, нас окружающие, так малы по сравнению с силами тяготения, что только осо-

[1] Детальное описание указанных выше опытов находится в Ann. d. Phys., 32, p. 411—437, 1910.

быми приемами их удается обнаружить в наших лабораториях. Но в межзвездном пространстве силы светового давления, действуя на тела с малыми массами, не только становятся соизмеримыми с силами тяготения этих масс, но могут и во много раз превосходить их по величине. Наиболее яркое проявление светового давления мы наблюдаем на образованиях кометных хвостов, и именно объяснение особенностей формы этих хвостов повело к выяснению роли светового давления в космических явлениях.

Факт, что кометные хвосты идут от головы кометы в направлении, противоположном Солнцу, был известен уже очень давно: так, уже Сенека [1] говорит; «Comae radios solis effugunt», но только Кеплер в своем трактате; «De Cometis». Libellus secundus. «Cometarum physiologia». (Augustae Vindelicorum. Anno 1619) дал нам то представление о кометах, которое в последующие триста лет было дополнено только в деталях.

Вот что говорит Кеплер о кометах [2]:

«О происхождении и натуре комет так понимать должно: как воды, преимущественно соленые, рыбами, так и эфир кометами изобилует; и как рыбы в волнах, так и кометы в эфире носятся».

«Что кометы главным образом, сверх Луны [3], в самой глубине эфира находятся, достаточно наблюдениями Тихона Браге доказано и примерами недавних комет подтверждается».

«Не менее, полагаю, эфир кометами изобилует, как океан рыбами. Тому же, что редко нам являются, причиною служит огромная обширность эфира. Часто они даже прежде перестают быть видимыми, чем существовать».

«По натуре всех вещей, полагаю, что когда материя в пространство вселенной извержена бывает, и сей пропускающий свет шар (голова кометы) прямыми лучами Солнца ударяется и пронизывается, то из внутренней материи кометы нечто им следует и тою же дорогою исходит, которой солнечные лучи пробивают и тело кометы освещают, истощают и, наконец, уничтожают: как шелкопряд, соткав кокон, так и комета, испустив хвост, истощается и, наконец, умирает».

«Указание на причину, что из материи кометного тела нечто непрерывно изгоняется солнечными лучами, силою оных, подал мне хвост кометы, о коем известно, что он всегда удаляется в сторону, противоположную Солнцу, и лучами Солнца формируется. И кроме того, невозможно, чтоб в чистом веществе эфира, за кометой находящемся, были бы видны лучи Солнца, если бы за кометой не распространялась некая материя. Ибо

---

[1] Seneca. Ad Lucilium Naturalium Quaestionum Lib VII. 20.

[2] Имеется полный перевод соответственной главы Кеплера, написанной неизвестной рукой; оттуда взяты приводимые здесь цитаты.

[3] До Кеплера астрономы полагали, что кометы носятся в воздушной атмосфере Земли.

у нас видеть Солнечные лучи невозможно, кроме как в материи, оные воспринимающей».

«Из сего явствует, почему хвосты комет искривляются. Лучи Солнца в чистом веществе эфира искривляться не могут. Ибо в оптике поучаемся, что лучи светил суть не дуги, но прямые линии. Итак, если, не взирая на это, известно, что кометный хвост получает свой образ от Солнечных лучей, то должно принять, что в хвостах или волосах кометы своя же материя существует, исторженная из тела кометы солнечными лучами».

«Дабы изъяснить сие примером, предположим, что дует ветер, хотя в небе ветры и не бывают. Сие представление делается весьма близким к истине, если рассматривать появление кометы в созвездии Весов в декабре 1618 г., ибо в какую сторону отклонялся хвост от противостояния Солнцу, в ту же и сама фигура хвоста уклонялась своим концом, и как бы боковой ветер, подметая, собирал кучу зерна в линию и переносил за нее. Или же вообразим себе, что скорость движения головы кометы так велика, что хвост, который все снова и снова извегается по направлению, противоположному Солнцу, отстает от головы меньше вблизи головы, больше в конце. Замечается во многих кометах, что они имели хотя и не кривые, прямые хвосты, как комета 1607 г.[1], но все хвосты несколько отклонены от противостояния с Солнцем, что ясно было видно и на комете 1618 г.».

«Сверх того, в кометах наблюдали хвосты разделенные, каковые видны были у кометы 1577 года. Отсюда следует, что поверхность шара головы кометы весьма неодинакова была, а поэтому каждый луч хвоста истекал из определенной и отдельной части этой поверхности».

«Итак, ни мало не сомневайся, читатель, что хвосты комет образуются Солнцем из материи, из головы изгнанной, и что свечение их есть освещение Солнцем, а не огонь какой-либо».

Прошло более двухсот лет после того, как Кепплер дал основные представления об образовании кометных хвостов, прежде нежели Бессель[2] (1836) развил строгую механическую теорию их форм.

Бессель принимал в своих рассуждениях, что отталкивательная сила Солнца убывает с квадратом расстояния[3], т. е. по тому же закону, как

---

[1] Комета 1607 года, которую наблюдал Кеплер, была периодическая комета Галлея

[2] B e s s e l. Astr. Hachr., 13, p. 185, 1836.

[3] Относительно физической причины отталкивательной силы Солнца Бассель склонялся к гипотезе Ольберса, что это явление обусловлено теми электрическими зарядами, которые несут Солнце и частипы кометного хвоста. Сам Ольберс (W. O l b e r s. Leben und Werke, 1, p. 331. Berlin, 1894) очень осторожно высказал свою гипотезу, указывая лишь, что «при разборе этих явлений трудно удержаться, чтобы не подумать, что здесь имеется нечто аналогичное нашим электрическим притяжениям и отталкиваниям». Бессель воспользовался гипотезой Ольберса, потому что она сразу давала закон взаимодействия (закон Кулона) и не остановился на трудности физической интерпретации процесса заряжения частичек, выделяемых головою кометы. Замена электрических сил гипотезы Ольберса световым давлением никаких изменений в теории Бесселя не требует.

и силы гравитационные, как убывает и яркость света, и что, следовательно, частица хвоста, отрываясь от головы кометы, начинает двигаться по траектории, соответствующей отталкивательной силе Солнца, т. е. по гиперболе, в одном из фокусов которой находится Солнце; голова кометы, двигаясь по параболе, непрерывно выделяет частицы, которые двигаются по ветвям гиперболы в направлении, противоположном Солнцу; если по истечении определенного интервала времени, в течение которого голова кометы проходит часть своего пути, определить геометрическое место частиц, выделенных ею на этом пути, то мы получим их изодинаму, или «хвост» кометы. Искривление этого хвоста, а также его наклонение к траектории кометы будет зависеть от величины отталкивательной силы Солнца, и Бессель указал, как обратно из измерений положения и кривизны хвоста можно определить числовую величину отношения между отталкивательной силой Солнца и его притяжением.

Особенно многим обязана теория кометных хвостов многочисленным исследованиям Ф. А. Бредихина [1], начало которых он положил в своей диссертации «О хвостах комет» (Москва, 1862).

Исследуя хвосты 50 комет, Бредихин нашел, что по величине отношения тех сил, с которыми вещества, входящие в их состав, отталкиваются Солнцем, к силам его притяжения все исследованные хвосты можно разделить на три типа.

I тип	—	отталкивательная	сила	18
II »	—	»	»	2,2 до 0,5
III »	—	»	»	0,3 до 0

Спектроскопические исследования показали, что в хвостах комет находятся как мелкие твердые частички, отражающие падающий на них свет Солнца в виде слабого непрерывного спектра, так и материя в газообразном состоянии, флуоресцирующая под влиянием солнечных лучей и дающая ярко выраженные спектры углеводородов, натрия и т. д.

В приложении теории светового давления к объяснению форм кометных хвостов задача сводится, таким образом, к определению отношения величины светового давления, которое производят лучи Солнца на малые тела и отдельные газовые молекулы, к величине той гравитационной силы, с которой Солнце притягивает их.

Первая попытка не только объяснить отталкивательные силы Солнца световым давлением, но и количественно подсчитать их была сделана Фитцджеральдом[2].

Вот как излагает Фитцджеральд ход своих рассуждений.

---

[1] Th. Bredichin's Mechanische Untersuchungen über Kometenformen (in systematischer Darstellung von R. Jaegermann). St. Petersbourg. 1903 (Издание Академии наук).

[2] G. Fitzgerald. Proc. of the Roy. Soc. Dublin, 3, p. 244, 1883.

«В последнем издании своего «Трактата об электричестве и магнетизме» Клерк Максвелл на странице 402 в § 793 вычисляет, что из электромагнитной теории следует, что солнечный свет давит на тело, которое его вполне поглощает, с силою

$$P = 4{,}22 \cdot 10^{-5} \text{ дин/см}^2\text{».}$$

«На расстоянии Земли от Солнца сила, с которою Солнце притягивает массу m равна

$$f = 0{,}59 \times m \text{ дин.}$$

Эта сила будет уравновешиваться, если поглощающая поверхность достаточно велика по отношению к массе, и, если обозначим через эту поверхность, то

$$S \times 4{,}22 \cdot 10^{-5} = 0{,}59 \times m$$

или

$$m = S \times 7 \cdot 10^{-5}.\text{»}$$

«Известно, что масса одной молекулы вещества, плотность которого Δ при обыкновенном давлении и температуре

$$m = \Delta \times 10^{-21},$$

откуда

$$S = 10^{-17} \times 1{,}4 \times \Delta.$$

Это дает возможность определить величину поверхности одной молекулы газа, поверхность которого Δ для случая, когда она не притягивается и не отталкивается Солнцем.»

«Если это имеет место для одного какого-либо расстояния от Солнца, то это остается верным и для всех других расстояний, так как и сила притяжения и сила света изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца».

«Для определения числовых величин необходимо сделать некоторые допущения, и я предполагаю, что молекула шаровидна и как таковая имеет наименьшую поверхность; предположу еще, что это молекула водорода. Обозначая через r радиус молекулы, мы имеем

$$S = \pi r^2 = 3{,}1 \times r^2 = 1{,}4 \cdot 10^{-17} \times \Delta,$$
$$r^2 = 4{,}4 \cdot 10^{-18} \cdot \Delta,$$

где Δ есть плотность вещества».

«В случае водорода имеем

$$\Delta = 8{,}8 \times 10^{-5},$$
$$r^2 = 38{,}72 \times 10^{-23},$$
$$r = 2 \times 10^{-11} \text{ (приблизительно),}$$

что составляет лишь одну десятитысячную долю величины, обычно приписываемой линейным размерам молекул».

«Газы поглощают не весь свет, который на них падает, но на основании приведенных выше расчетов становится возможным предположить, что легкий газ, молекулы которого велики, каковы некоторые сложные углеводороды, которые поглощают значительную долю падающих на них лучей, не только могут находиться в равновесии под влиянием притягательной силы Солнца и отталкивания его лучами, но также могут и отбрасываться Солнцем со значительной силой. Было указано, что необходимо допустить отталкивательную силу Солнца для кометных хвостов. Эта сила, однако, не должна, как сила тяготения, быть пропорциональной массе тела, так как некоторые кометы имели более одного хвоста, а это указывает на действие разных ускорений на отдельные части кометной материи. Это находится в полном согласии с гипотезой, которую я высказал выше. Отталкивание Солнца зависит от поверхности молекул и их способности поглощать лучистую энергию, и эти свойства не пропорциональны их массам».

Пользуясь цифровыми данными, которые приводит Фитцджеральд, легко вычислить, что «для поглощающего падающий на него черный свет» шара, радиус которого r *см*, а плотность S, гравитационная постоянная Солнца должна быть поправлена на световое отталкивание, и мы получаем множитель F[1]:

$$F = 1 - \frac{1}{20000 r \delta}.$$

Отсюда видно, что метеориты, диаметры которых измеряются несколькими сантиметрами (плотность их $\delta > 5$), двигаются вокруг Солнца почти так же, как планеты, и только на траектории очень маленьких метеорных масс (метеорной пыли) отталкивательное действие солнечных лучей оказывает заметное влияние; если голова кометы состоит из агломерата мелких метеоритов, то при прохождении мимо Солнца она будет деформироваться, несколько вытягиваясь в направлении своего движения.

Особенно интересны те случаи, когда тела, двигающиеся около Солнца, настолько малы, что отталкивание под влиянием светового давления начинает играть преобладающую роль. Здесь следует заметить, что приведенные выше рассуждения Фитцджеральда, вполне верные для тел, размеры которых велики по сравнению с длинами волн падающих на них световых лучей, становятся принципиально недопустимыми для малых

---

[1] P. Lebedew. Wied. Ann., 45, p. 292, 1892 (см. выше стр. 000), а также реферат об отступлениях от закона Ньютона в Vierteljahrschr. d. Astronom. Geselschaft, 37, p. 220, 1903. Согласно новейшим измерениям, яркость солнечных лучей почти вдвое больше той величины, которую принимали Максвелл и Фитцджеральд, а потому числовой фактор 20 000 должен быть заменен 10 000.

тел, соизмеримых с длинами этих волн, так как в этом случае приходится считаться с дифракционными явлениями; для отдельных молекул подсчет давления еще более удаляется от соотношения, указанного Максвеллом, так как здесь мы имеем дело с явлением резонанса.

Вычисление величины того давления, которое свет производит на маленький шар, соизмеримый с длиной волны падающих на него лучей, представляет собой аналитически очень сложную задачу, которую для шара, вполне отражающего свет, впервые решил Шварцшильд [1]. Впоследствии эту задачу в общем случае для шаров отражающих, поглощающих и преломляющих свет, удалось решить Дебаю [2]. Для выяснения роли светового давления в движении метеорной пыли около Солнца мы можем не входить в рассмотрение всех результатов, полученных в выше упомянутых исследованиях, так как мы не знаем ни оптических свойств, ни форм отдельных зерен метеорной пыли, и уже поэтому должны ограничиться определением порядка величины светового давления на малые тела. Вот что по этому поводу говорит Шварцшильд.

«Если мы обозначим через U отношение величины светового давления, производимого монохроматическими лучами на очень большой шар к количеству лучистой энергии, падающей на него в единицу времени, то это отношение медленно возрастает при уменьшении диаметра шара. Когда диаметр шара уменьшится до двух третей длины волны падающих на него лучей, то это отношение быстро начинает расти и при диаметре, равном одной трети волны света, достигает максимальной величины $U = 2{,}5$. При дальнейшем уменьшении диаметра шара это отношение падает еще быстрее, чем оно нарастало раньше. Для диаметра шара в одну пятую волны света это отношение становится меньше единицы и при дальнейшем уменьшении диаметра быстро приближается к нулю».

Чтобы определить ту максимальную величину, с которой Солнце может отталкивать зерна метеорной пыли, Шварцшильд (l, с., р.) вычислил эту величину для пылинок, плотность которых равна единице, а диаметр меньше одной тысячной доли миллиметра, полагая, что все излучение Солнца — монохроматическое и имеет длину волны $\lambda = 0{,}6\,\mu$ (оранжевый цвет). Результаты вычислений показывают, что отношение отталкивательной силы Солнца к его гравитационной силе с уменьшением диаметра пылинки постепенно растет и для пылинок в две десятитысячных доли миллиметра достигает максимальной величины, равной 20.

Но если мы примем во внимание, что, во-первых, излучение Солнца не монохроматично и что, следовательно, такого резко выраженного максимума отталкивания не будет, а, во-вторых, что плотность зерен метеорной пыли надо полагать больше единицы, то мы должны предположить, что отталкивательные силы Солнца, действующие на метеорную

---

[1] K. Schwarzschild. Ber. d. Münch. Akad. Wiss., 31, p. 293—330, 1901.
[2] P. Debye. Ann. d. Phys., 30, p. 57, 1909.

пыль, вряд ли вдвое превосходят силы притяжения Солнца. Этих сил, однако, вполне достаточно, чтобы объяснить образование хвостов третьего типа Бредихина. Отталкивательные силы, во много раз превосходящие притяжение, проявляются при действии света на отдельные молекулы, а резкие очертания кометных хвостов, соответствующих этим силам, показывают, что частицы их однородны.

Исследуя пондеромоторное действие волн на резонаторы, я указывал [1], что давление света на газы кометных хвостов следует рассматривать как давление электромагнитной волны на резонатор и что это давление связано с избирательным поглощением молекулы.

Дебай (l. c. p. 101) сделал первую попытку вычислить величину давления солнечных лучей на схематическую молекулу-разонатор и нашел, что эта величина может быть огромна. Но определить числовую величину этого давления для молекул газов составляющих кометные хвосты, мы не можем, так как до настоящего времени экспериментально еще не определены коэффициенты поглощения света отдельными молекулами: лабораторные исследования в этом направлении, помимо их приложения к теории кометных хвостов, представляют собой и самостоятельный интерес для оптики.

Из приведенного вполне видно, что задача объяснить формы кометных хвостов световым давлением, которую триста лет тому назад поставил себе Кеплер, в настоящее время для метеорной пыли уже решена, а для газов близка к своему окончательному решению, так как те теоретические и экспериментальные исследования, которые были сделаны до сих пор, дают достаточную уверенность, что путь к решению ее найден.

---

[1] P. Lebedew. Wied. Ann., 62, p. 172, 1897.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Т. П. КРАВЕЦ

ПЕТР НИКОЛАЕВИЧ ЛЕБЕДЕВ

(1866—1912 гг.)

Петр Николаевич Лебедев не только прославил русскую науку выдающимися трудами по самым животрепещущим вопросам современной ему науки, но и создал обширную физическую школу, в которой воспитал плеяду талантливой молодежи. Он первый организовал лабораторию, в которой будущий ученый-физик мог творчески работать. Воспитание достойной смены, подготовка руководящих кадров русской физики стали осуществляться в широких масштабах и без иностранной помощи.

П. Н. Лебедев родился в 1866 г. в Москве, в купеческой семье. Отцу П. Н. было в это время 25 лет: он был доверенным известной чайной фирмы Боткиных [1], но имел и свое «дело». Кроме сына, в семье было еще две дочери. Одна из них, Александра Николаевна, впоследствии, после смерти П. Н., была неутомимой собирательницей и хранительницей материалов и документов, относящихся к биографии П. Н. Лебедева.

Николай Всеволодович, отец П. Н. Лебедева, старался привить сыну мысль, что только коммерческая карьера может обеспечить ему ту обстановку довольства и даже роскоши, в которой он его воспитывал (у мальчика была собственная верховая лошадь, а впоследствии — гоночная лодка). Учиться П. Н. начал на коммерческом отделении Петропавловского (немецкого) училища. Товарищами его были преимущественно сыновья богатой московско-немецкой буржуазии. Из училища молодой Лебедев вынес превосходное знание немецкого языка (он впоследствии владел им не хуже русского). Дневники и письма его показывают, что ему пришлось выдержать упорную борьбу с отцом, чтобы открыть себе дорогу к высшему

[1] Семья Боткиных дала России ряд культурных деятелей: П. П. Боткин — писатель, автор «Испанских писем», друг И. С. Тургенева; С. П. Боткин — профессор Медико-хирургической академии; Н. П. Боткин — художник, академик живописи.

образованию. Но, конечно, еще труднее была борьба с самим собой, борьба за выход из класса, с которым его связывали семейные узы, знакомства и дружба, а более всего — привычка к легкой и беспечной жизни.

Мальчик был одинок в этой борьбе. Мы можем указать только два-три фактора, которые могли оказать ему помощь. Это, прежде всего, ранняя дружба с двумя выдающимися впоследствии людьми. Первый — Саша (Александр Александрович) Эйхенвальд, впоследствии известный русский ученый-физик, сын художника-фотографа А. Ф. Эйхенвальда и профессора консерватории И. И. Папендик-Эйхенвальд. А. А. был старше Лебедева на 4 года и не мог не оказывать на него большого и полезного влияния. Другой товарищ детских лет Лебедева — Николай Разумникович Кочетов, сын певицы, профессора пения А. Д. Александровой-Кочетовой, серьезно увлекался в детстве астрономией; впоследствии он стал музыкантом и композитором. Дневники П. Н. Лебедева пестрят записями о разговорах с его друзьями на самые различные темы.

Знакомый семьи Лебедевых, офицер-электрик А. П. Бекнев, показал ему несколько «самодельных» опытов по электричеству. П. Н. Лебедев пристрастился к «электричеству» и со школьных лет увлекся изобретательством, преимущественно в этой области. Его дневники и записные книги переполнены схемами, чертежами и изобретательскими предложениями. Впоследствии П. Н. Лебедев расценивал эти свои работы очень низко, но некоторую долю считал и позже остроумными. В то время он был так увлечен этим делом, что окончательно решил порвать с коммерческой карьерой и заняться техникой. Отец в конце концов уступил. П. Н. Лебедев перешел в реальное училище Хайновского (по его описанию — истинный вертеп, наподобие бурсы Помяловского). Окончив его, он поступил в Техническое училище.

Для дальнейшей биографии П. Н. Лебедева, по его собственному признанию, большое значение имело одно его изобретение, а именно — униполярная машина. Идея построения такой машины без дорогостоящего коллектора представлялась ему весьма заманчивой. Его машина понравилась главному инженеру Машиностроительного завода Густава Листа, и было решено ее построить сразу в рабочем размере. Но машина тока не дала. Эта неудача тяжело поразила гордого и самолюбивого девятнадцатилетнего юношу, но не сразила его, а только открыла ему глаза на недостаточность его научной подготовки. К сожалению, постановка преподавания физики в Техническом училище не стояла на должной высоте.

Одним из преподавателей оказался В. С. Щегляев — очень слабый ученый; с ним впоследствии П. Н. полемизировал в чрезвычайно резких тонах, но все же под его руководством выполнил свою первую научную работу (оставшуюся ненапечатанной).

В это время, в начале 1887 г., в возрасте 47 лет умирает его отец от той самой сердечной болезни, от которой впоследствии было суждено сойти в могилу почти в том же возрасте самому П. Н. Лебедеву. Оставшись



П. Лебедевъ

обладателем не слишком большого, но достаточного для существования состояния, он приводит в исполнение свою мечту — поехать учиться за границу; в то время только там можно было приобрести настоящие научные навыки.

Справедливость требует отметить, что Техническое училище [1], которое он описывал как весьма уродливое учреждение, все же дало молодому П. Н. Лебедеву нечто весьма полезное: согласно программе Училища, он приобрел практическое умение работать на тисках и на станке, превосходно разбирался во всяком механическом инструменте и столь же превосходно чертил. Все это нимало способствовало впоследствии славе его «золотых рук».

Для своего заграничного обучения П. Н. Лебедев избрал Страсбургский университет, славившийся знаменитой лабораторией Августа Кундта. Вероятно, он сделал это по рекомендации своего учителя В. С. Щегляева, который ранее сам учился в той же лаборатории. Кундт был всемирно известный физик-экспериментатор. Физики хорошо знают «трубку Кундта» для определения скорости звука в газах, аномальную дисперсию, им открытую, его исследования свойств газов при низких давлениях.

Кундт пользовался большой любовью и уважением своих учеников, в том числе и П. Н. Лебедева. Впрочем, и Кундт заметно выделял П. Н. Лебедева среди прочих своих учеников, быстро оценив его необычайный экспериментаторский талант и неутомимое «горение» в вопросах науки.

Институт, построенный Кундтом, был, безусловно, по тому времени передовым. Среди молодых ассистентов Кундта и его практикантов во времена Лебедева собралась плеяда талантливых физиков: Отто Винер, который как раз в то время делал свою знаменитую работу о стоячих световых волнах; Пашен — впоследствии крупный спектроскопист и исследователь явления Зеемана; Рубенс, прославившийся (позже) работами в области инфракрасных волн; из наших соотечественников — Б. В. Голицын — впоследствии академик, создатель школы сейсмологов и вместе с тем крупный оптик, исследователь явления Допплера — Физо; В. А. Ульянин — впоследствии профессор (работал в Казани). Со многими из них П. Н. Лебедев и впоследствии поддерживал научные связи. В особенности сблизился он с Голицыным; они вместе изучали научную литературу, делились своими «находками», а при разлуках обменивались огромными, в десятки страниц, письмами, также научного содержания.

Ему пришлось пройти довольно суровую школу целого ряда последовательных, систематических неудач, которые чуть-чуть не подорвали его веру в себя. По-видимому, эти неудачи объяснялись стремлением сделать сразу большую по значению и трудную работу.

В 1888 г. Кундт переехал в Берлин: туда же перебрался и Лебедев. Здесь он слушал лекции Гельмгольца, которые произвели на него глубокое

---

[1] Оно было основательно реформировано в начале 90-х годов прошлого века.

впечатление. Неудачи в работе продолжались и здесь. Наконец, Кундт встревожился за своего ученика и настойчиво стал предлагать ему вернуться в Страсбург (директором института там стал Ф. Кольрауш, известный исследователь явлений электропроводности в электролитах) и сделать хорошую диссертационную работу, чтобы затем вернуться к своим рискованным и сверхтрудным задачам. П. Н. Лебедев последовал совету своего наставника.

В Страсбурге он попал в прежнюю научную обстановку провинциального университета; но новый руководитель был человек совершенно иного склада, чем Кундт; очень основательный, осторожный, совершенно не склонный к рискованным экспериментам. Он охотно принял в свою лабораторию П. Н. Лебедева; последний взялся за задачу об определении диэлектрических постоянных паров.

Так как мы переходим к ознакомлению с научными работами П. Н. Лебедева, то нам придется сказать несколько слов о тех научных интересах, которые были характерны для той, ныне уже далекой эпохи. Это было до появления электронной теории и теории относительности, до открытия квантов. Теперь даже трудно представить себе, чем можно было заниматься, когда эти великие этапы еще не были пройдены.

В 1887—1889 гг. были поставлены потрясшие все основы тогдашней физики опыты Герца: физическое миропонимание спешно перестраивалось на «электромагнитный лад», и все, что было в физике живого и действенного, включалось в эту работу. Но теория Максвелла, на которой основывалась новая картина мира, оставалась для многих, в особенности для чистых экспериментаторов, нагромождением сложных математических выводов. Ясными казались только основные следствия теории: 1) в пустоте (или, как тогда выражались, «в свободном эфире») электромагнитные возмущения распространяются со скоростью, численно равной отношению электромагнитных и электростатических единиц, т. е., как это было известно со времени классических опытов Вебера и Кольрауша, практически — со скоростью света: 2) для тел, отличающихся от пустоты, показатель преломления должен равняться корню квадратному из диэлектрической постоянной; 3) свет должен давить на тело, на которое он падает, с силой (на единицу площади), которая равна количеству энергии (в единице объема), создаваемому совокупностью падающего и отраженного излучения.

Ко времени, когда Лебедев начинал свою работу, сведения о диэлектрических постоянных были очень скудны. Существовала теория Клаузиуса — Моссотти, которая связывала эту константу вещества с молекулярными характеристиками; она принимала молекулы за проводящие шарики и указывала на связь между величиной диэлектрической постоянной и степенью пространственного заполнения объема молекулами. Величина пространственного заполнения, с другой стороны, определялась незадолго перед тем (1881) открытым уравнением Ван-дер-Ваальса. Пространственное

заполнение можно было изменять, меняя или давление пара, или его температуру. Лебедев и занялся прежде всего возможно более точным определением диэлектрических постоянных для десяти различных парообразных тел при разных давлениях и температурах, а затем — проверкой тех соотношений, которые указывали теории Клаузиуса — Моссотти и Ван-дер-Ваальса. П. Н. Лебедев получил хорошее совпадение с теорией: впоследствии он любил говорить, что теория здесь оказывается пригодной даже за пределами тех рамок, для которых она создавалась.

От проверки соотношений Максвелла П. Н. Лебедев сознательно уклонился: ему уже было известно, что это соотношение не может быть верно для произвольно выбранного спектрального участка: оно, безусловно, правильно для очень длинных электромагнитных волн, но для таких волн не существовало данных об их показателе преломления.

Втянувшись в эту работу, П. Н. Лебедев вложил в нее много остроумия и экспериментального искусства: а главное — на ней он получил уверенность в своих силах и в своей способности довести исследование до конца. В его письмах появляются более спокойные и уверенные высказывания. А когда вслед за тем он с успехом выдерживает докторские экзамены, он, оглядываясь назад на испытанные им драматические сомнения и колебания, видит перед собой необъятное поле работы на поприще, которое он навеки и страстно полюбил («как отец любил свое дело», пишет он матери).

По-видимому, в последний год (1891 г.) своего пребывания за границей П. Н. Лебедев много занимался теорией Максвелла и опытами Герца, хотя и был занят доработкой своей диссертации. Это видно из того, что после своего возвращения в Москву он занялся этими вопросами: кроме этого, еще до отъезда из Страсбурга он закончил одну теоретическую работу, по-видимому, единственную, так как теория никогда не была его стихией. Дело идет о действии сил светового давления на поверхность малых небесных тел (космической пыли). Рассуждение приблизительно таково; если у шарика уменьшить радиус в 10 раз, то поверхность (и сила поверхностного давления) уменьшится в 100 раз, а объем (а потому и масса, и тяготение к светилу) — 1000 раз. При последовательном уменьшении радиуса наступит такой момент, когда сила светового давления сравняется с силой всемирного тяготения; при дальнейшем уменьшении радиуса сила светового отталкивания начнет превосходить притяжение. Вот новое объяснение для наблюдаемых и предполагаемых уклонений небесных тел от ньютонова закона всемирного тяготения. В особенности яркий пример представляют кометные хвосты, направленные всегда в сторону, противоположную Солнцу. Но Лебедев с чрезвычайной зрелостью и проницательностью воздерживается от применения своих рассуждений к случаю газовых молекул; молекулы—не шарики; они имеют сложное строение и собственные периоды колебания, или, иначе говоря, пред-



Здание, в котором помещались физические лаборатории Московского университета. В этой лаборатории в 1899 г. П. Н. Лебедев открыл световое давление на твердые тела

ставляют собой резонаторы. Действие на них волн зависит от отношения собственной частоты и частоты падающих волн. Работа П. Н. Лебедева вызывает всеобщее внимание. Она доложена на заседании, под председательством Кольрауша, в Страсбурге и напечатана в 1891 г. на русском языке, а в следующем году на немецком, тогда же она напечатана и в английском переводе.

С 1891 г. П. Н. Лебедев в Москве. Несколько раньше Б. Б. Голицын успел выдержать магистерские испытания при С.-Петербургском университете и устроился приват-доцентом и ассистентом в Московском университете. По-видимому, он не пожалел перед руководителями кафедры физики — А. Г. Столетовым и А. П. Соколовым — добрых слов относительно своего приятеля. П. Н. Лебедев получил предложение вступить в число младших преподавателей Московского университета и принял это предложение.

Вряд ли радостны были его первые впечатления в Москве. Правда, к нему тепло относился А. Г. Столетов, и П. Н. Лебедев скоро по достоинству оценил этого крупного ученого и большого человека. Из других профессоров он сблизился с химиком В. В. Марковниковым и в особенности с Н. Е. Жуковским; позднее, по-видимому, возникла его близость с К. А. Тимирязевым.

Физическая лаборатория имела весьма неприглядный вид и ютилась на одном этаже маленького двухэтажного домика, между химическим и анатомическим корпусами. П. Н. Лебедев получил здесь для работы одну комнату, отделявшуюся от передней занавеской из черного молескина.

В лаборатории работал всего один механик, а оборудование состояло из одного простенького станка. Экспериментальных исследований никаких не велось.

Тяжесть обстановки усугубляло отсутствие научного общения. Кундт придавал этому огромное значение, и организованный им «коллоквиум» был одним из самых ярких воспоминаний П. Н. Лебедева. В Москве единственным местом для научных собраний был в то время физический отдел Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии. По протокольным записям мы можем проследить за теми чрезвычайными усилиями, которые П. Н. Лебедев приложил, чтобы сделать из этого отдела подобие страсбургского коллоквиума.

Единственным человеком, с которым П. Н. мог «отвести душу», был все тот же Б. Б. Голицын. Но и тут подошла беда: диссертация Голицына была забракована Столетовым и Соколовым. Голицын, отвергнутый Московским университетом, был выбран адъюнктом Академии наук, что еще подлило масла в огонь. Лебедев имел гражданское мужество высказать Голицыну свое неодобрение этому избранию. Отношения между приятелями надолго испортились, да к тому же Голицын переехал сначала в Юрьев, а потом в Петербург. Своей последующей научной работой он утвердил за собой репутацию солидного, крупного ученого.

Большой успех выпал на долю П. Н. Лебедева в 1893 г., когда он на Съезде естествоиспытателей и врачей в Москве с блеском демонстрировал опыты Герца.

Одновременно он берется за свою следующую научную тему — исследование механических действий волн на резонаторы. Мы видели выше, что действие света на молекулу он понимал именно таким образом, и работа его имела целью ознакомить с явлением в молекулах по соответственному проявлению сил на крупной «модели» молекулы — резонаторе молярных размеров. Он так пишет об этом в введении к своей докторской (на русском языке) диссертации: «Непосредственно и притом в достаточно простой форме экспериментально исследовать действие света на отдельные молекулы какого-либо тела не представляется возможным, а потому я обратился к опытам с длинными электромагнитными волнами Герца, заставляя их действовать на схематическую «молекулу», которая обладает интересующими нас свойствами: иметь собственный период колебаний,— ею является подвешенный на крутильной нити резонатор». Такое исследование составило предмет первой главы его работы. В дальнейшем П. Н. Лебедев расширяет свое исследование на колебания гидродинамические и акустические. Совершенно различные по возбуждающим их

силам они, как оказалось, абсолютно тождественны по проявляемым действиям. «Это показывает,— пишет П. Н.,— что те элементарные законы, к которым сводятся наблюденные явления, должны быть независимы от физической природы данных колебаний и воспринимающих их резонаторов»... «Главный интерес исследования пондеромоторного действия волнообразного движения лежит в принципиальной возможности распространить найденные законы на область светового и теплового испускания отдельных молекул»... Но «нет никаких данных, позволяющих сказать что-либо определенное о свойствах молекул-резонаторов. Некоторое указание... может дать только спектрально-аналитическое изучение процессов излучения».

Работа с перерывами тянулась с 1894 по 1897 г., в виде отдельной брошюры появилась как докторская диссертация в 1899 г. В 1900 г. диссертация была защищена (П. Н. Лебедев, как автор выдающегося труда, был освобожден от магистерских испытаний и от защиты магистерской диссертации); с 1901 г. П. Н. Лебедев — профессор Московского университета.

Работа над механическими действиями колебаний на резонаторы не нашла большого отклика в научной литературе; но для самого П. Н. Лебедева она была немаловажным этапом развития. Мы намеренно цитировали те места, которые показывают, как через диссертацию тянутся нити от его первой работы, об отталкивательной силе лучеиспускающих тел, к главной работе его жизни — к работе над световым давлением.

Исследование электромагнитных резонаторов привело П. Н. Лебедева к мысли попробовать свои силы на установлении некоторого «рекорда» в области коротких электромагнитных волн. Он и ставит его в знаменитой работе о двойном лучепреломлении «лучей электрической силы» (1895). П. Н. Лебедев обнаруживает волны в 6 и даже в 4 *мм* длины — ровно в 100 раз меньше длин волн, исследованных Герцем. Волны, открытые П. Н. Лебедевым, «были ближе к более длинным волнам теплового спектра, чем к электрическим волнам, которыми в начале пользовался Герц».

Эта работа окончательно утвердила за П. Н. Лебедевым славу одного из лучших экспериментаторов. Он мечтал, что выработанная им методика всюду будет подхвачена и использована для исследования чисто оптического характера в новом спектральном участке. Но она оказалась по плечу ему одному. Только в двадцатых годах его рекорд был перекрыт исследованиями А. А. Глаголевой-Аркадьевой и независимо М. А. Левицкой.

Сказанная П. Н. Лебедевым (см. выше) фраза о спектральном анализе вызвана большой работой, проделанной им в этой области. В 1900 г., еще не будучи профессором, П. Н. Лебедев прочел специальный курс по коротким электромагнитным волнам, привлекший большую аудиторию.

В 1896 г. и в два последующих года П. Н. Лебедев отдал известную дань увлечению только что открытыми Рентгеном X-лучами. Он шел по пути изучения их избирательного поглощения, как позже Баркла. Но проделанная работа не была подготовлена к публикации.

В это же время он прочел несколько специальных докладов, написал некролог о своем учителе А. Кундте (умершем в 1894 г.) и статью о трудах А. Г. Столетова, читал публичные лекции об X-лучах и приступил к постановке в лаборатории научных работ. В 1894 г. была закончена первая работа, сделанная под его руководством. Это — экспериментальное исследование затухания акустических резонаторов, выполненное П. Б. Лейбергом.

Мы видим, с какой исключительной энергией молодой П. Н. Лебедев (ему в 1896 г. минуло всего 30 лет) берется за возведение в России «здания современной физики».

Мы подходим к главной работе всей жизни П. Н. Ясно, что такой работой, естественно, должно было стать доказательство сил светового давления.

Впервые о работе П. Н. Лебедева над световым давлением стало известно в 1899 г. В этом году летом в Париже, во время всемирной выставки, проходил также конгресс физиков, на котором Лебедев сделал свое первое, предварительное сообщение об этой работе. В чем заключается главная трудность работы? Когда свет падает на какое-нибудь тело и нагревает его (при неполном отражении), то от тела нагревается окружающий его газ и в газе создаются тепловые (конвекционные) потоки, которые действуют на тело, выводя его из положения равновесия. Чтобы уменьшить влияние этих потоков, естественно производить опыт в баллоне, из которого выкачан воздух. Но тогда на сцену выступают новые, так называемые радиометрические, силы, открытые Круксом: если передняя и задняя поверхности пластинки, на которую падает свет, нагреваются до различных температур, то сталкивающиеся с ними частицы газа будут получать при отражении различные скорости, с различной силой отталкивая назад пластинку. Эти радиометрические силы иногда бывают в тысячи раз больше искомых сил светового давления и совершенно их заслоняют.

Как же Лебедев преодолел все эти трудности? Мы нарочно остановимся на этом несколько подробнее, чтобы дать понятие о блестящей технике эксперимента Лебедева.

Чтобы устранить конвекционные потоки, возникающие от нагревания подвешенной пластинки, он наблюдает ее отклонение, освещая ее то с одной, то с другой стороны. Нетрудно сообразить, что при этом силы светового давления (и радиометрические) меняют направление, а силы конвекционных потоков сохраняют прежнее направление; зная это, можно отделить одни силы от других. Конвекционные потоки могут возникнуть еще у стенок сосуда, если тепловые лучи поглощаются стеклом

стенок и нагревают его. Чтобы этого не было, лучи предварительно проходят через толстые пластинки стекла, которые отфильтровывают все поглощаемые лучи. Наконец, если к воздуху в баллоне примешаны поглощающие свет газы, то потоки могут зарождаться в самом газе. Чтобы устранить это, Лебедев тщательно избегает всяких загрязняющих воздух смазок, склеек и т. п. Чтобы уменьшить по мере возможности радиометрические силы, нужно уменьшить разницу температур передней и задней поверхностей пластинки. Для этого пластинка берется из хорошо теплопроводящего металла и делается предельно тонкой. Откачивание сосуда было в то время особенно трудной операцией; оно продолжалось сутками и далеко не достигало результатов, которые легко и быстро даются современными насосами. Лебедев вел откачивание до возможного предела, а затем действовал так: на дне сосуда у него помещалась капелька ртути; он слегка (градуса на 4) нагревал ее и заставлял удаляющиеся пары ртути увлекать за собой остатки воздуха в баллоне.

Всеми этими простыми на вид средствами он добился того, что мешающие наблюдениям конвекционные и радиометрические силы стали играть роль небольших ошибок опыта. Это доказывается таким образом: радиометрические силы должны действовать на черную поверхность сильнее, чем на блестящую, так как сильнее ее нагревают. Наоборот, силы светового давления проявляются сильнее у блестящей поверхности, так как у нее, кроме энергии падающего пучка, имеется еще энергия пучка отраженного. В условиях опытов П. Н. Лебедева действие лучей всегда было больше при отражающей поверхности, меньше — при черной. Отсюда ясно, что в этих опытах радиометрические силы действительно были сведены до минимума.

Простота описанных приемов поражает не только физика. Но эта простота обманчива: работа П. Н. Лебедева была очень сложной и трудной. Он довел ее до конца только в результате огромных усилий. Это подорвало здоровье П. Н. Лебедева, он целый год лечился за границей, но уже никогда не был вполне здоров.

После работы над световым давлением П. Н. Лебедев стал знаменит: журналы домогались его статей, на съездах и конгрессах ставились его доклады. Работа была напечатана в русских, немецких, английских и американских журналах. Замечателен доклад Лебедева на Съезде немецкого астрономического общества летом 1902 г. Здесь он снова обращается к космической роли светового давления, т. е. к теме юношеских лет. Но теперь он говорит, как «власть имеющий», что световое давление — уже не гипотеза, а несомненный факт, доказанный поставленным опытом.

К этому времени относится расцвет работы Лебедева; растет его школа — в ней работает уже свыше десятка учеников; выполнен целый цикл работ по волновому давлению. П. Н. Лебедев, наконец, решается организовать коллоквиум при своей лаборатории, и опыт увенчивается блестящим успехом. Он читает интереснейший курс «новостей физики»,

публикует ряд работ и популярных статей. Особенно интересна работа о пустотных термоэлементах. В этих работах проявились его тонкие знания в области явлений при низких давлениях — начало этих знаний заложено на коллоквиумах Кундта, а затем проявляется в работах по коротким волнам и световому давлению. Как ни удивительно, современные пустотные термоэлементы запатентованы и известны под другими именами. Из популярных статей замечательна «Шкала электромагнитных волн в эфире». Эта статья с блеском и изяществом подводит итоги электромагнитному пониманию явлений излучения. В это же время возникают связи П. Н. Лебедева с Академией наук. Он деятельно работает в русском отделении Международного союза по исследованию Солнца, пишет чрезвычайно интересные и содержательные статьи о кажущейся дисперсии межзвездного пространства и т. д.

Но, несмотря на всю эту кипучую деятельность, он занят подготовкой новой капитальной работы по световому давлению — работы по давлению света на газы. Мы видели, что уже ранее П. Н. Лебедев неоднократно указывал на невозможность отождествления молекул газа с небольшими шариками. Проведенные исследования по выяснению действия волн на резонаторы показали, что следует ожидать в отношении действия света на отдельные молекулы газа. Настало время заняться непосредственно этой задачей. Она была безмерно трудной: давление света на газы в десятки раз меньше давления его на твердые тела. Трудна задача и по чрезвычайно большому числу мешающих измерению сил другого происхождения, часто во много раз превосходящих исследуемые. Мы не будем подробно излагать отдельные этапы этой работы, напоминать многие остроумнейшие приемы, которые применил П. Н. Лебедев для ее решения. Результат работы убедителен и несомненен: силы давления света на газы доказаны, с хорошим приближением измерены и найдены равными той величине, которая ожидается теоретически. Космическое значение светового давления утверждено на экспериментальной базе.

Попытки определить давление света на твердые тела, проведенные другими исследователями еще при жизни П. Н. Лебедева, не были успешными. Установить давление света на твердые тела стало возможным лишь после того, как физики вооружились новой вакуумной техникой—той техникой, которая доводит разрежение газов до пределов, превосходящих рекорды начала века в сотни раз. В двадцатых годах рядовая сотрудница университетской лаборатории (Алиса Гольсон в лаборатории Герлаха) проводит измерения, которые окончательно устраняют влияние радиометрических сил и констатируют наличие неисчезающего остатка; он как раз равен ожидаемой по теории величине светового давления.

В лаборатории О. Штерна совершенно иным путем удалось констатировать наличие сил давления света на газы. Для этого был применен метод так называемого молекулярного пучка; последний отклонялся в сторону под влиянием падающего на него сбоку и поглощаемого им

пучка лучей света. Учет сил светового давления стал играть огромную роль в термодинамике излучения после того, как Больцман показал связь, существующую между величиной светового давления, яркостью излучения черного тела и температурой. Поэтому без имени Лебедева не обходится ни один трактат, посвященный этому вопросу.

Эффект светового давления имеет огромное значение в астрофизике. Эддингтон и Джинс обратили внимание на те громадные величины, которые эти силы должны принимать при температурах, господствующих внутри звезд (порядка миллионов градусов). Милн указал на их роль и на особенности их проявления в атмосферах небесных светил. Во всех случаях, обращаясь к истории вопроса, должно рядом с именем Максвелла назвать имя Лебедева.

Работа по световому давлению на газы (1910 г.) была венцом научной деятельности Лебедева. Он начал еще замечательную работу о сущности земного магнетизма, связывая намагничение Земли с ее вращением.

Нам остается сказать несколько слов о школе П. Н. Лебедева и об обстоятельствах его ухода из университета.

У П. Н. Лебедева было столько новых идей, планов новых работ, а его текущая работа при глубине его подхода к ней давала повод к стольким вопросам, что он всем существом своим чувствовал необходимость приобщить к своей работе сотрудников и учеников. Он — один из первых в мире физиков, который показал, что коллективная работа является наиболее удачным методом физического исследования.

Работа над электромагнитными резонаторами властно требует от П. Н. Лебедева изучения резонаторов других видов теми же методами, которые в области электромагнитных волн созданы Бьеркнесом — так появилась работа П. Б. Лейберга. П. Н. Лебедеву необходимо связать оптические величины показателей преломления и поглощения с их величинами в области электромагнитных волн — это послужило началом работ А. Р. Колли, В. И. Романова, В. К. Аркадьева (специально магнитные свойства) и др.

Световое давление требует своего дополнения исследованием давления в более широком смысле — волн на поверхности воды, звуковых волн. Это дает начало работам Н. А. Капцова, В. Я. Альтберга. Когда звуковое давление доказано, оно делается методом для измерения силы звука, сравнивается с другими методами — это диссертация В. Д. Зернова. Звуковое давление становится индикатором для изучения неслышимых ухом ультразвуковых волн (вторая работа В. Я. Альберга), в частности для изучения их поглощения в атмосфере (Н. П. Неклепаев).

Тонкие соображения о процессах в разреженных газах (в связи с исследованием пустотных термоэлементов) дают начало работам А. К. Тимирязева («Трение в разреженных газах») и П. П. Лазарева. Оптические работы П. Н. Лебедева заставили его интересоваться спектральным анализом — и вот работы К. П. Яковлева («Спектрограф для инфракрасных лучей») и Т. П. Кравца («Исследование природы широких полос поглоще-



Портрет П. Н. Лебедева 90-х годов

ния красителей в растворах»). Другая работа П. П. Лазарева (о фотохимическом выцветании красителей), может быть, была начата по личной инициативе последнего, но методика ее выполнения — чисто лебедевская. Эта методика применяется в первой работе С. И. Вавилова («Температурный коэффициент фотохимической и тепловой реакции выцветания»).

Создание измерительных приборов было немаловажной задачей лаборатории Лебедева. Так, В. Д. Зернов строит фонометр — прибор для измерения силы звука: В. И. Эсмарх исследует оригинальную методику магнитной защиты для гальванометров. П. Н. Лебедев любил переносить методы измерения из одной области физики в другую. Выше было сказано о работах В. Д. Альтберга и Н. П. Неклепаева по ультразвукам. Особое изящество этих работ заключается в проведении их чисто оптическими методами. Сюда же следует отнести работу А. В. Млодзиевского по определению скорости коротких звуковых волн методом, весьма близким к методу Физо для определения скорости света.

Ряд работ лаборатории был посвящен демонстрационным целям. Сюда относятся работы Н. К. Щодро («Применение дуги высокого напряжения для получения и демонстрации коротких электромагнитных волн») и чрезвычайная изящная работа Е. В. Богословского по демонстрации распространения, отражения, преломления и т. д. капиллярных волн на поверхности жидкостей.

Мы, конечно, не могли назвать здесь всех работ, вышедших из лаборатории Лебедева и упомянуть имена всех его учеников.

Работал П. Н. Лебедев с огромным увлечением, и это не могло не отражаться на его больном сердце. Но, может быть, он бы справился с болезнью и дал бы науке и стране еще больше, если бы не катастрофа, обрушившаяся на него да и на всю русскую науку в 1911 г. Расскажем несколько подробнее об этом печальном событии.

В результате упорной борьбы университеты во время первой революции добились автономии: все руководящие университетские должности (ректор, проректор, деканы) стали выборными. Управление университетами, поддержание в них академического порядка было доверено самим университетам. Общий полицейский строй государства находился в полном противоречии с этим исключительным положением, которое заняли университеты. И вот в самом начале 1911 г. министр народного просвещения, сам бывший профессор Московского университета, Л. А. Кассо издает циркуляр, предлагающий университетским властям при первых признаках студенческих «беспорядков» обращаться к помощи полиции. Циркуляр был незаконным вмешательством министра в область компетенции самого университета. Президиум Московского университета (А. А. Мануилов, М. А. Мензбир, П. А. Минаков) представил Совету университета доклад, в котором у Совета испрашивал полномочий на неисполнение циркуляра. При начавшихся затем сходках полиция вызвана не была. Тогда министр уволил трех членов президиума в отставку. Члены Совета

сочли своим долгом разделить ответственность лиц, которые исполняли предначертания Совета. Несколько десятков профессоров подали в отставку; за ними потянулись младшие преподаватели. Для П. Н. Лебедева настали часы мучительных колебаний и сомнений: он был тяжело болен, от его былого состояния оставались только небольшие суммы; он нигде и никогда не имел совместительств; нигде, кроме университета, для научной работы того размаха, который дал ей Лебедев, почвы не было. Но он поставил на карту все и подал в отставку вместе с другими.

В последний год своей жизни он был морально вознагражден за свой поступок. После ухода Лебедева началась энергичная кампания за создание для Лебедева частным порядком тех условий, которых ему не давала царская власть. Ряд университетов, в том числе и заграничных, предложили ему свои кафедры. Но было уже поздно. 1 (14) апреля 1912 г. больное сердце остановилось навсегда.

* * *

П. Н. Лебедев не только автор замечательных работ и родоначальник школы русских физиков, но и цельный, глубоко интересный человек. Он поражал всех своей необычайной внешностью: громадного роста, столь же громадной физической силы, тренированный в юношестве спортом (гребля, альпинизм), с прекрасным лицом — он являл образ мужественной красоты в самом высоком понимании этого слова. В круг своих собратьев, московских ученых, он пришел из другой среды и резко отличался от среднего интеллигента и образованием, и манерами, и одеждой, поэтому среди них он не всегда считался «своим». Беседа его была оригинальная, образна и никогда не забывалась. Как и его учитель Кундт, он не искал популярности, не заискивал перед аудиторией, с учениками был подчас чрезвычайно резок. Требовательность к работе, как своей, так и чужой, доходила у него до крайности. И все же обаяние его таланта было таково, что работать у него считалось редким счастьем.

Таким же счастьем эта работа остается и в воспоминаниях его учеников.



Н. А. КАПЦОВ

РОЛЬ ПЕТРА НИКОЛАЕВИЧА ЛЕБЕДЕВА В СОЗДАНИИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ КАДРОВ [1]

Огромные достижения Петра Николаевича Лебедева в деле научного исследования всем хорошо известны. Что Петр Николаевич Лебедев был одним из крупнейших физиков своей эпохи, никем не оспаривается. Но в деятельности этого выдающегося человека была и другая, не менее важная, но нередко забываемая и недооцениваемая сторона. Гениальный ученый, в исследованиях которого исключительная глубина мысли сочеталась с необыкновенным искусством эксперимента, П. Н. Лебедев был одновременно организатором широко поставленной коллективной научной работы в области физики. Он принадлежал к тем ученым, которые не только сами двигают науку вперед, но и вовлекают в эту работу молодое поколение. Заветной мечтой Петра Николаевича было передать своим ученикам свой метод, свое умение научно и творчески мыслить, воспитать из них ученых, способных удовлетворить практические запросы родины. К этому делу он относился с таким же увлечением, с такой же любовью, как к своим собственным научным исследованиям. Преждевременная кончина прервала многогранную деятельность Петра Николаевича Лебедева. Но и то, что он успел сделать для подготовки в нашей отсталой в те времена стране полноценных научно-исследовательских кадров в области физики, имеет громадное значение в настоящее время, когда непрестанными заботами Правительства и Партии в Советском Союзе созданы все условия для развития передовой науки и когда развитие всех отраслей физики непрерывно сочетается с бурным развитием новой техники, необходимым для перехода к коммунистическому строю.

П. Н. Лебедев, получив летом 1891 г. ученую степень доктора философии Страсбургского университета, вернулся в Москву и получил здесь

[1] Доклад в Физическом институте АН СССР на заседании 12 марта 1962 г., посвященном 50-летию со дня смерти П. Н. Лебедева.

возможность работать над циклом задуманных им исследований в физической лаборатории, основанной в Московском университете А. Г. Столетовым для практических работ студентов. Известны те трудности, которые встали перед Лебедевым при организации в этой лаборатории исследовательской ячейки с необходимой при ней мастерской. Хорошо известен и тот грандиозный триумф, который выпал на долю Петра Николаевича Лебедева, когда он закончил основной этап этого цикла работ и доложил в 1900 г. об экспериментальном подтверждении давления света на твердые тела на Всемирном конгрессе физиков в Париже.

Уже в этот период деятельности Петр Николаевич начал вербовать себе учеников среди студентов старших курсов. В 1896 г. была опубликована работа П. Б. Лейберга, которому Петр Николаевич поручил исследовать затухание акустических резонаторов в связи с собственными исследованиями пондеромоторного действия акустических волн на резонаторы. С того же года в лаборатории Петра Николаевича начал работать Торичан Павлович Кравец, впоследствии чл.-корр. АН СССР, а с 1899 г. Андрей Робертович Колли, впоследствии профессор Варшавского университета. Ему Петр Николаевич поручил исследовать поведение диэлектрического коэффициента в полях высокой частоты путем изучения распространения коротких электромагнитных волн по системе лехеровских проводов, помещенных в жидкость. Это было первое задание, полученное учениками Лебедева в области исследования электромагнитных волн и поведения вещества при прохождении этих волн. Это задание и задания в той же области, полученные позднее другими учениками Лебедева, были тесно связаны с его работой «О двойном лучепреломлении лучей электрической силы» (1895 г.), в которой он исследовал поведение волн Герца с длиной волны 6 *мм* и добился получения электромагнитных колебаний с длиной волны 3 *мм*. Открытие Лебедевым давления света на твердые тела также нашло отражение в исследовательских темах, предложенных им в те годы начинающим физикам. Руководствуясь своими широкими взглядами и обобщениями в области физики, Петр Николаевич пришел к выводу, математически подтвержденному несколько позднее Рэлеем, что давление на препятствующие их распространению тела должны оказывать волны любой природы. Поэтому в 1901 г. он предложил В. Я. Альтбергу измерить давление звуковых волн. Альтберг успешно выполнил эту работу, а В. Д. Зернов под руководством Лебедева использовал звуковое давление для построения прибора, позволяющего определять силу звука в абсолютных единицах. В 1902 г. автор этого доклада получил от Петра Николаевича задание обнаружить экспериментально и измерить давление волн, распространяющихся на поверхности воды.

Перечисленные выше работы производились все в той же столетовской студенческой лаборатории. Аппаратура для каждой из этих работ размещалась среди столов, на которых была расставлена аппаратура для задач студенческого практикума. Работать приходилось только в вечерние часы

(после 3 часов дня, когда заканчивалось время, отведенное для «общего практикума» студентов).

Своих учеников Петр Николаевич в те годы вербовал среди студентов, занимавшихся в практикуме. Он следил за теми из них, относительно которых было известно, что они хотят специализироваться по физике. Если ему случалось приезжать в лабораторию в часы занятий общего практикума, он вступал с этими студентами в беседу, стараясь выяснить, насколько сознательно они выполняют полученные экспериментальные задания, каково их общее развитие, как они разбираются в вопросах физики. И если он находил среди них молодого человека с подходящими данными, то приглашал его проводить «специальную работу» под его, Лебедева, руководством. Таким образом, он производил как бы тот отбор, который имеет теперь место при приеме в аспирантуру. Читавшиеся им в те годы с большой охотой и увлечением факультативные курсы «Современные задачи физики», «Прохождение электрического тока через газы» и другие были направлены на то, чтобы возбудить в слушателях стремление к научному исследованию и показать им задачи и методы этого исследования. При чтении этих курсов и в лабораторных беседах Петр Николаевич не раз предупреждал слушателей не принимать на веру все то, о чем сказано в толстых учебниках. Он считал, что чересчур гладкое изложение в них материала затушевывает противоречия и неясные, еще не разрешенные вопросы, не стимулирует научную мысль, научное исследование. Не раз он говорил: «Приступая к научной работе, берите за отправной пункт не то, что сказано в толстых учебниках, а оригинальные научные работы по тому вопросу, который вы собираетесь исследовать».

В 1904 г. была закончена постройка здания Физического института во дворе так называемого старого здания университета (Моховая, 11). Лебедеву в этом здании были отведены под его личную лабораторию две большие комнаты во втором этаже и полуподвальное помещение для руководимых им работ — известный впоследствии «лебедевский подвал». Подвальное помещение Петр Николаевич выбрал сознательно, считая что оно лучше других частей здания ограждено от сотрясений. Несмотря на то, что в первое время приборов было еще мало, а вместо столов нередко использовались ящики из-под оборудования, это была уже настоящая исследовательская лаборатория, не связанная, как раньше, с общестуденческим практикумом. Работать можно было в любые часы без ограничения времени и не мешая другим. В самой большой комнате лаборатории была расположена мастерская с токарным станком, большим слесарным верстаком и необходимым набором инструментов. Все работы в этой мастерской, по мысли Лебедева, должны были выполнять для себя его ученики. Овладение ремесленными навыками Лебедев считал необходимым для каждого физика-экспериментатора. Только в случае очень сложной аппаратуры привлекался механик, работавший в личной лаборатории Лебедева. Стеклодува также не было. Каждый работающий должен был научить-

ся паять трубки и собирать установки, требующие стеклянной аппаратуры.

Петр Николаевич приезжал теперь в университет ежедневно около 11 часов утра, спускался в подвал и начинал обход рабочих комнат лаборатории, поочередно и нередко подолгу беседуя с каждым из работающих. В этих беседах он не делал различия между студентом, впервые приступающим к исследовательской работе, и человеком, уже посвятившим этой работе несколько лет. Он требовал от каждого из своих учеников сознательного отчета обо всем проделанном. Сильно, подчас резко, пробирал он за допущенные промахи, за недостаточно обдуманные шаги в эксперименте. Но делал он это с единственной целью поднять работу данного ученика на более высокий уровень. Поэтому обижаться на него за резкость выражений было невозможно.

Петр Николаевич, прежде всего, требовал, чтобы каждый из работавших в лаборатории строго продумывал весь план своей работы. Но этот план исследовательской работы должен был быть не застывшим и раз навсегда установленным, а деятельным и живым. Как только в ходе исследования выяснялись какие-либо новые данные, Петр Николаевич после короткого раздумья оживлялся и предлагал новое, не предусмотренное прежним планом, направление работы. Ему тут же приходило в голову множество свежих мыслей. Он увлекался ими, рисовал перед молодым исследователем новые широкие горизонты, увлекал его своим энтузиазмом. В эти минуты он, может быть, больше чем в любом другом случае передавал своим ученикам крупицу столь ценного у него уменья, выражаясь словами Кундта, «физически мыслить», посвящал их в тайны своего научного творчества.

Из рабочих комнат Петр Николаевич переходил в мастерскую: его всегда интересовало, насколько тот или иной из его учеников освоил уменье работать своими руками. Обычно разговор принимал здесь уже более общий характер. Все присутствовавшие жадно прислушивались к тому, что он говорил о новейших научных и технических достижениях, которые он всегда узнавал из первоисточников, а также к его оценке текущих событий университетской жизни. В этой оценке он всегда выступал, как противник рутины и чиновнического, бюрократического отношения к научным исследованиям, от кого бы оно ни исходило. Беспощадно высмеивал он людей с миросозерцанием чиновников, которые не хотели понимать, что истинная наука не может существовать без постоянного движения вперед, а, в частности, физика — без глубокого экспериментального исследования. Раз в неделю лица, работавшие под руководством Лебедева, и некоторые из более старых работников Физического института собирались на коллоквиум, который он проводил регулярно. Начало этих коллоквиумов было положено еще в столетовском помещении физической лаборатории за круглым столом, стоявшим в библиотечной комнате. В коллоквиумах принимали участие на равных правах работавшие у Лебедева студенты,

старшие работники «лебедевского подвала» и сам Петр Николаевич. Все были обязаны готовить и докладывать рефераты по текущей литературе. Так как эта литература в подавляющей массе была на немецком и английском языках, то участие в коллоквиуме заставляло основательно овладеть уменьем читать литературу на этих языках. Своими вопросами к докладчику, своими всегда интересными и меткими замечаниями Петр Николаевич оживлял дискуссию и заставлял всех присутствующих принимать активное участие в обсуждении. Большим праздником для каждого физика, работавшего под руководством Лебедева, был тот день, когда после долгой и упорной работы ему разрешалось сделать на коллоквиуме доклад о результатах собственного исследования. Петр Николаевич был очень требователен в этом отношении. Он не позволял ни делать доклад, ни посылать работу в печать, если находил ее в чем-либо незаконченной или если она не была литературно хорошо оформлена. Он всегда старался привить своим ученикам уменье писать ясно и коротко. По его указаниям текст статьи перерабатывался автором по нескольку раз. Бывало и так: «Все это хорошо», — говорил он, просмотрев третий или четвертый вариант статьи, — «Вы выполнили мои указания. Но все, что Вы написали в таком-то разделе, нужно только для Вас; для читателя Вашей статьи это не имеет значения. Вычеркните этот раздел и, вообще, сократите статью. Длинных статей сейчас никто не читает».

Особенно строг был Петр Николаевич в своих требованиях к оформлению чертежей. Но его критика и его указания никогда не были абстрактны. Указывая, как надо написать статью, он сам набрасывал план, вступительные фразы к отдельным разделам, эскизы чертежей. После одобрения последнего варианта статьи Петр Николаевич обычно сам переводил ее на немецкий язык. Таким образом, одновременно с печатанием ее в русском журнале статья направлялась им в «Annalen der Physik» с сопроводительным письмом, содержащим просьбу корректуры направлять лично ему. В своих беседах с руководимыми им молодыми физиками Петр Николаевич касался не только непосредственных вопросов данной работы. Он говорил о новых достижениях в области физики, ставших ему известными благодаря его обширной переписке с выдающимися представителями этой науки, а также касался и той цели, для которой он готовил своих учеников. Он говорил; «Продолжайте работать так, как Вы работаете. Не смущайтесь тем, что Ваши результаты кажутся мало значащими. При упорной работе Вам удастся сделать и что-либо крупное («поймать слона», как он выражался). Имейте в виду, придет время, когда физики в России будут нужны». Петр Николаевич видел в занятии наукой не только одно безотчетное стремление удовлетворить жажду знания, но он лучше многих своих современников понимал, что техника не может двигаться вперед без науки, а наука без техники. Интерес к новейшим достижениям последней он старался привить и своим ученикам. Убеждая своих учеников заниматься научным исследованием, он в то же время водил их

осматривать первую большую электростанцию в Москве (ныне МОГЭС) и во время этой экскурсии серьезно и подробно интересовался ее устройством и принципами ее работы. В статье «Русское общество и русские национальные лаборатории» он писал: «Большие физические лаборатории, исключительно предназначенные для научных исследований, уже давно существуют на Западе. Неуклонно разрабатывая научные вопросы, они, как показал опыт, совершенно негаданным образом обогащают технику».

Отметим еще одну черту в деятельности П. Н. Лебедева как руководителя школы. Петра Николаевича интересовали не только его непосредственные ученики. Он внушал этим ученикам мысль, что они должны продолжать дело привлечения молодежи к научной работе в дорогой ему области. Такие заветы он давал, отпуская А. Р. Колли на работу в Варшавском университете и В. Д. Зернова в Саратовском. Когда около 1910 г. число работавших в «лебедевском подвале» лиц возросло до 35, он передал непосредственное руководство некоторыми из них Петру Петровичу Лазареву. Таким образом, еще в недрах лебедевской школы возникла новая школа.

Петр Николаевич Лебедев учил руководимых им начинающих физиков «физически» работать, он помогал им усвоить все тонкости экспериментального искусства, он учил их глубоко продумывать вопросы физики, учил пользоваться литературой, учил излагать свои мысли на бумаге, учил плановости в работе, внушал им сознание обязательности научной работы для ученого. Он вдохновил многих из них на всю жизнь своим необыкновенным талантом и необыкновенным обаянием своей личности и направил их работу по определенному руслу в той или иной области физики. Ученики Лебедева не только продолжали исследовательскую работу, но и работу Лебедева в деле создания научных кадров в той или иной области физики. Продолжали эту деятельность и те более молодые физики, которые не имели постоянного общения с Лебедевым, но примкнули к его школе в год его смерти или около этого времени (С. И. Вавилов, С. Н. Ржевкин, Б. В. Ильин, Н. Е. Успенский и другие) и успели почти непосредственно воспринять в среде своих старших товарищей научные заветы Лебедева и созданную им научную культуру. Продолжали дело Лебедева и ученики его учеников. В стенах этого Института нет надобности говорить о работах школ П. П. Лазарева, С. И. Вавилова и других. Присутствующие знают их лучше меня. В Московском университете работу школы Лебедева в советское время продолжал в области исследования магнитных явлений и коротких электромагнитных волн чл.-корр. АН СССР В. К. Аркадьев. Из школы Аркадьева вышли в числе других академик Б. А. Введенский — выдающийся специалист в области радиофизики и действительный член АН БССР Н. С. Акулов, развивший ряд новых направлений в области исследования ферромагнитных явлений. В Московском же университете другими учениками П. Н. Лебедева развит обширный цикл работ в области электроники и газовых разрядов. Мысль о необходи-

мости работы в этом направлении неоднократно подчеркивалась П. Н. Лебедевым в его беседах и факультативных лекциях. Школа Лебедева дала ростки и в других местах. В этом беглом обзоре мы, конечно, не полностью охватили и назвали учеников Лебедева и учеников его учеников, плодотворно работающих одновременно как в области научной работы, так и в области руководства начинающими физиками.

Различна была судьба тех физиков, которые когда-то начали свои первые шаги под руководством П. Н. Лебедева или при ближайшем общении с теми лицами, о принадлежности которых к школе Лебедева в годы его жизни никто не сомневается. Одним удалось сделать в области научного исследования больше, другим—меньше. В своей совокупности ученики Лебедева и ученики его учеников продолжали и продолжают начатое им дело привлечения молодых сил к исследовательской работе по физике, создали и создают весьма ощутительную долю тех кадров научных работников физиков, которые работают в научных и научно-технических институтах нашей родины. Только в наше время им уже не приходится убеждать своих учеников, что «физики в России будут нужны», не приходится доказывать, что физика и техника неразрывно связаны между собой. Это делает теперь сама жизнь и обстановка грандиозного развития народного хозяйства.

Научные коллоквиумы вошли в традицию лабораторий и кафедр, во главе которых стоят ученики Лебедева и ученики его учеников. Эти коллоквиумы работают каждый в пределах определенной области физики. На них не только разбирается текущая литература, но и обсуждаются отдельные глубокие вопросы данной области. Они сыграли немалую роль как в развитии научного исследования, так и в подготовке сознательных и квалифицированных молодых научных кадров. Как пример, можно указать на коллоквиумы, ведущиеся на многих кафедрах физического факультета Московского университета.

Петр Николаевич оставил после себя школу физиков и притом школу не формально выражающуюся только в том, что тот или иной советский физик когда-то был учеником Лебедева, а широкую действительную школу, живую и растущую. Эта школа проявляет свое существование в развитии тех областей физики, глубоким исследованием которых Петр Николаевич побуждал заниматься своих непосредственных учеников еще в столетовской лаборатории и «лебедевском подвале».

Вместе с тем деятельность школы Лебедева выражается в наше время и в привлечении к научной работе по физике ежегодно новых и новых сотен из числа талантливой молодежи великой Советской страны. Учениками и учениками учеников Лебедева непрерывно готовятся кадры физиков, отвечающих заветам П. Н. Лебедева и способных удовлетворить запросы страны — запросы народного хозяйства нашей эпохи. Роль всей деятельности Петра Николаевича Лебедева в деле подготовки этих кадров поистине велика.

ПРИМЕЧАНИЯ РЕДАКЦИИ

1. Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссотти — Клаузиуса

Впервые напечатана на немецком языке в 1891 г. в ведущем физическом журнале того времени «Видемановских анналах», т. 44, стр. 288—310, и отдельной брошюрой, с прибавлением краткого биографического очерка (для представления в качестве диссертации).

На русском языке впервые появилась в 1913 г. в «Собрании сочинений», в переводе коллектива учеников П. Н. Лебедева. Здесь дается тот же текст с весьма небольшими редакционными поправками. Подлинная рукопись П. Н. (на немецком языке) находится в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 1, 2.

История этой работы такова. Молодой Лебедев, последовавший за своим учителем Кундтом из Страсбурга в Берлин, потерпел ряд неудач в осуществлении своих сверхтрудных замыслов. Обеспокоенный этим, Кундт посоветовал ему возвратиться в спокойную обстановку Страсбурга и сделать там работу «обыкновенного» масштаба.

Работа над этой темой отражена в дневниках и переписке П. Н. с момента, когда Кольрауш одобрил предложенную Лебедевым тему (письмо к матери в начале мая 1890 г.). В дальнейшем почти в каждом письме к матери сообщается о благополучном ходе работы; Лебедев чувствует, что «эту синицу уже держит в руке, оставив журавля летать в небе» (8.V 1890). «Диссертация начинает выходить элегантней, чем я предполагал» (18.XII890); 21.VI 1891 он сообщает: «Диссертацию написал». В письме к Б. Б. Голицину (17.V 1891) он вкратце излагает ее содержание и объясняет, почему считает «нелепым» сопоставлять диэлектрические постоянные с показателями преломления. Кольрауш остался диссертацией доволен и предложил напечатать ее без сокращений в «Видемановских анналах» (письмо к матери 14.VII 1891).

Однако нельзя не заметить, что работа над этой темой не увлекла П. Н.

Впоследствии опыт, приобретенный при измерениях диэлектрических постоянных, подсказал Лебедеву тему, которую он дал одному из своих учеников Г. Б. Порту. Статья последнего уже после кончины Лебедева появилась в «Анналах», т. 42, стр. 569—584, 1913.

1. Игнатий Клеменчич (1853—1901) — профессор (работал в Граце, Инсбруке), известен исследованиями электрических колебаний на ранней стадии их изучения, предложил (1891) термоэлектрический метод их измерения, которым П. Н. неоднократно пользовался.

2. Фридрих Кольрауш (1840—1910) — крупный физик, занимался исследованиями электролитической проводимости, автор «Руководства по практической физике», профессор, второй (после Кундта) учитель П. Н. Лебедева в Страсбурге (работал

в Цюрихе, Дармштадте, Вюрцбурге, Страсбурге; затем, после Гельмгольца — президент Государственного физико-технического института (Physikalisch-technische Reichsanstalt).

3. Джон Гопкинсон (1849—1898) — физик, автор известной теории магнитного потока (работал в Лондоне).

4. Эйльхардт Видеман — профессор, занимался вопросами люминесценции (работал в Лейпциге, Эрлангене).

5. О Тегетмейере, Палаце, Фуксе, Кэсси, Михалевском и Целлере биографических данных нет.

6. Эмиль Варбург — профессор (работал в Страсбурге, Берлине) президент Государственного физико-технического института до 1922 г., выполнял работы по разным разделам физики, в частности по фотохимии.

7. Латимер Кларк (1822—1898) — ученый, сотрудник Трансатлантической телеграфной компании. Изобрел в 1872 г. «постоянный элемент».

8. Георг Квинке — профессор (работал в Бюрцбурге и Гейдельберге), провел ряд работ по металлооптике, тонким поверхностным пленкам, поставил «опыт Квинке».

9. Элевтер Маскар (1837—1908) — французский физик, занимался вопросами оптики и электричества.

10. Густав Видеман (1826—1899) — профессор (работал в Брауншвейге, Карлсруе и Лейпциге), автор «Handbuch d. Electricität», в течение многих лет был редактором «Annalen der Physik».

11. Жюль Жубер (1834—1910) — французский физик, автор краткого учебника по электричеству и обширного курса, написанного совместно с Маскаром.

12. Димитрий Негреану (1858—1908) — профессор, академик (работал в Румынии, в Бухаресте).

13. Людвиг Лоренц (1829—1891) — весьма крупный датский теоретик, независимо от Г. Лорентца вывел формулу для рефракции конденсированных систем (формула Лорентца — Лоренца).

14. Готтлиб Адлер (1860—1893) — профессор математической физики (работал в Вене), выполнил несколько работ по диэлектрической поляризации.

15. Эдвард Роза (1861—1921) — американский ученый, известный специалист по электрическим измерениям, точно определил отношение электромагнитных и электростатических единиц.

16. С. Ф. Терешин (1863—1921) — профессор физики в Военно-медицинской академии (диссертация по диэлектрическим постоянным жидкостей), одновременно с П. Н. Лебедевым работал в Страсбурге.

17. Эрнс Дорн — профессор, занимался физикой, метеорологией и метрологией (работал в Дармштадте, Бреславле и Галле).

18. Фридрих Экснер — геофизик, профессор Венского университета.

19. Часть работы была представлена философскому факультету Страсбургского университета как диссертация на степень доктора философии. В конце, согласно положению, была напечатана «Vita», т. е. краткий биографический очерк (жизнеописание). Приводим последний в переводе.

Жизнеописание

«Я, Петр Лебедев, сын покойного купца Н. В. Лебедева, родился 8 марта 1866 г. в Москве. Свое школьное образование я получил в Евангелическом Петропавловском церковном училище и в Реальном училище Хайновского там же. С сентября 1884 по март 1887 посещал Московское высшее техническое училище.

Чтобы посвятить себя изучению физики, я учился с октября 1887 по август 1889 в Страсбурге, зимний семестр 1889/90 — в Берлине, а с пасхи 1890 по июль 1891 снова в Страсбурге.

Во время моего учения я слушал лекции у следующих господ профессоров и доцентов:

а) в Москве: Давыдовского, Михалевского, Шапошникова, Щегляева, Жуковского, Слугинова;

б) в Страсбурге и Берлине: Христоффеля, Кона, Фиттига, Галльвакса, Гельмгольца, Кольрауша, Кратцера, Кундта, Маурера, Рейе, Шеринга, Штенгера, Винера, Целлера.

Всем этим господам, моим уважаемым учителям, я выражаю свою глубокую благодарность».

Упоминаемые здесь лица: В. Ф. Давыдовский — читал физику в Техническом училище, после был инспектором МГУ и, наконец, деканом физико-математического факультета Московских высших женских курсов; Н. А. Шапошников — читал в МВТУ высшую математику; В. С. Щегляев (1857—1919) и Н. П. Слугинов (1854—1897) — профессора физики в МВТУ; последний вскоре после поступления П. Н. в МВТУ перешел профессором в Казанский университет; Н. Е. Жуковский (1847—1924) — знаменитый механик, создатель отечественной авиации, читал механику в МВТУ и в МГУ; Эльвин Христоффель (1829—1900) — известный математик, специалист по дифференциальным уравнениям математической физики; Эмиль Кон (1854 —) — теоретик, автор известного в свое время курса «Das electromagnetische Feld», учитель А. А.Эйхенвальда, Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси; Рудольф Фиттиг (1835—1910) — профессор химии (работал в Страсбурге); Вильгельм Галльвакс (1859—1922) — профессор (работал в Дрездене), один из первых исследователей фотоэффекта; Герман Гельмгольц (1821—1894)—крупнейший ученый, физик, физиолог, соавтор открытия закона сохранения энергии; Адольф Крацер (1858 —) во времена студенчества П. Н. был профессором математики (работал в Страсбурге), ученик Христоффеля; Август Кундт (1839—1894) (о нем см. статью П. Н. в настоящем сборнике); Лудвиг Маурер (1895 —)— математик, в год появления П. Н. в Страсбурге (1887) только что приступил к преподавательской работе; Теодор Рейе (1838—1919) — геометр (работал в Страсбурге), учитель А. А. Эйхенвальда; Карл Шеринг (1854—1925) — магнитолог, профессор (работал в Страсбурге); Франц Штенгер (1859—1893) — ученик Кундта, в дальнейшем стал заниматься электротехникой, П. Н. считал его талантливейшим учеником Кундта; Отто Винер (1862—1927) был ассистентом Кундта, впоследствии стал профессором (работал в Лейпциге), известен по работе над стоячими световыми волнами 1891).

2. Об отталкивательной силе лучеиспускающих тел

Впервые статья напечатана (на русском языке) в «Трудах Отд. физ. наук ОЛЕАЭ»*, т. 4, вып. 2, стр. 1—3, 1891 и на немецком языке в «Annalen der Physik», том, стр.292—297, 1892. Подлинные рукописи хранятся в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 6, 7.

История работы прослеживается по дневникам П. Н. и его переписке с матерью. Сначала мысль П. Н. Лебедева была направлена на объяснение межмолекулярных сил как пондеромоторного действия друг на друга колеблющихся резонаторов. Впервые об этом упоминается в дневнике (16.II 1890), а затем в письме к матери из Берлина (25.III 1890). Мысль о возможности применения этой идеи для космических целей появилась значительно позже; об этом Лебедев пишет в письме к матери (8.I 1891). Вся дальнейшая переписка с матерью, вплоть до сообщения о последнем докладе на коллоквиуме (30.VII 1891), содержит упоминания о работе над этой темой. Работа была напечатана только после приезда П. Н. в Москву осенью 1891 г. Есть более ранние наброски (те же фонд и опись, № 3, 4 и 5). В последнем варианте развивается мысль о трении, испытываемом движущимися и в то же время излучающими свет телами.

1. Адольфо Бартоли (1851—1896) — профессор (работал во Флоренции, Павии), основоположник термодинамики излучения.

2. Сэмюэль Лэнглей (1834—1906) — американский ученый, известный исследователь солнечного излучения, изобретатель болометра.

---

* ОЛЕАЭ — Общество любителей естествознания, антропологии и этнографии.

3. Значение солнечной постоянной близко к 2,00 *кал/см²·мин* (по исследованиям 1954 г.). Соответственная поправка должна быть внесена во все последующие выкладки.

4. Юлиус Шайнер (1858—1913) — астроном (работал в Потсдаме), специалист по астрофизике и астрофотографии (сенситометр Шайнера).

5. Ф. А. Бредихин (1831—1904) — крупный астроном, профессор МГУ, академик, автор общепризнанной теории кометных хвостов.

6. Фридрих Целльнер (1834—1882) — астроном, автор гипотезы об электрической природе «отталкивательных» сил в кометных хвостах, создатель астрофотометрии.

7. Эрве Фэй (1812—1902) — профессор (работал в Париже), известен работами по Солнцу, кометам и космогонии.

8. Христиан Христиансен (1843—1917) — датский ученый, оптик, открыл аномальную дисперсию; указанная здесь величина коэффициента пропорциональности ныне принимается равной 0,0079 (считая константу закона Стефана равной $5{,}67\cdot10^{-5}$ *эрг*$\cdot$*см*$^{-2}\cdot$*сек*$^{-1}$).

9. Внеся сюда правильное значение солнечной постоянной и учитывая поправку (прим. 8), получаем почти ту же величину, которая дана в формуле (9).

3. О движении звезд по спектроскопическим исследованиям

Как указано в авторском подстрочном примечании, статья представляет собой доклад, прочитанный на публичном заседании Отделения физических наук Общества любителей естествознания, антропологии и этнографии. Не все доклады Лебедева в последующем были напечатаны. Первым увидевшим свет и был настоящий доклад (напечатан в «Трудах Отделения», т. 5, вып. 1, стр. 6—13, 1892). Этот доклад отражает постоянный интерес Лебедева к вопросам спектрального анализа.

Подлинная рукопись П. Н. — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 8.

1. П. Н. читал свой доклад в 1892 г., т. е. за 8 лет до появления теории квантов. Поэтому о волновой природе света здесь говорится, как о чем-то, не возбуждающем сомнения.

2. Уильям Гюйгенс (1824—1910) — один из первых исследователей в области астроспектроскопии.

3. Христиан Допплер (1803—1853) — профессор в Вене, одно из его многочисленных исследований — «принцип Допплера», установленный для звуковых волн (1848).

4. Арман Физо (1819—1896) — французский оптик, измерил скорость света, распространил принцип Допплера на область оптических волн (1870).

5. Герман Фогель (1842—1907) — директор обсерватории в Потсдаме, пионер астрофотографии, изобрел сенсибилизацию фотографических материалов (1876).

6. Лабораторным путем проверка принципа Допплера для световых волн осуществлена впервые А. А. Белопольским (1901), а также Б. Б. Голицыным и И. И. Вилипом (1905).

7. Сейчас применение фотографии при решении астрофизических задач не вызывает сомнения. Но в свое время понадобились обширные исследования для установления такой возможности.

8. Ныне известно, что такой точной взаимозаменяемости «освещенности», с одной стороны, и «выдержки», с другой стороны, не наблюдается.

4. Август Кундт

Напечатана в «Трудах Отд. физ. ОЛЕАЭ», т. 7, вып. 1, стр. 35—45, 1892. Подлинная рукопись — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 11.

Представляет собой весьма полную характеристику научной и педагогической деятельности Кундта, данную одним из самых близких ему учеников.

1. Густав Магнус (1802—1870) — профессор, академик (работал в Берлине), организатор первой в Европе лаборатории для научных работ практикантов. Учитель Кундта; см. о нем в «популярных речах» Гельмгольца.

2. О Когене, Коленко, Ростовцеве, Световидове данных нет. О Терешине см. прим. ред. 15 к ст. 1.

3. Винко Дворжак (1848—1922) — профессор (работал в Загребе), открыл звуковое давление на резонаторы, провел ряд работ по акустике.

4. Гейнрих Кайзер — крупный спектроскопист, автор многотомного Справочника по спектроскопии.

5. Фридрих Неезен — профессор Артиллерийской академии в Берлине.

6. Карл Штрекер — работал в области телеграфии, в молодости (1881) изучал свойства газов.

7. Варбург — см. прим. ред. 6 к ст. 1.

8. Франсуа Ле ру (1832—1907) — профессор (работал в Париже). Наблюдал аномальную дисперсию паров иода (1862).

9. Христиансен — см. прим. ред. 8 к ст. 2.

10. Эдуард Кеттелер (1839—1900) — выдающийся оптик старой школы, автор весьма важных трудов по аномальной дисперсии света.

11. Эуген Ломмель (1857—1899) — профессор (работал в Эрлангене), автор многочисленных трудов по теории интерференции, дифракции, люминесценции, дисперсии.

12. Селльмейер — биографических данных нет. Известна «формула Селльмейера» для выражения закона дисперсии.

13. Вольдемар Фохт (1850—1919) — профессор, оптик (работал в Гетттингене), провел многочисленные работы по теоретической оптике, по теории дисперсии, по магнето-оптическим явлениям и пр.

14. Лео Гретц—профессор (работал в Мюнхене), одно время был ассистентом Кундта. На русском языке был издан его весьма элементарный учебник по электричеству.

15. Иоган Пулуй (1845—1918) — профессор (работал в Праге). Известен его прибор для определения механического эквивалента тепла.

16. Адольф Винкельман (1848—1910) — известен в основном как издатель «Handbuch der Physik» в 1890-х годах.

17. Г. Г. Де Метц (1861—1947) — профессор (работал в Киеве). Известны его работы по двойному преломлению жидкостей.

18. Эуген Блазиус — ассистент, позже профессор (работал в Страсбурге, Берлине), провел ряд работ по кристаллографии и др.

19. Павел Чермак (1857—1912) — профессор (работал в Граце и Иннсбруке).

20. Работы Фарадея о магнитном вращении плоскости поляризации см. т. III его «Экспериментальных исследований», 19 серия.

21. Джон Керр (1824—1907) — шотландский ученый, открывший первое электрооптическое явление.

22. Генрих Дюбуа (1863—1918) — магнитолог, профессор (работал в Берлине). Известны гальванометр Дюбуа — Рубенса, электромагнит Дюбуа и др.

23. Пауль Друде (1863—1906) — профессор (работал в Гиссене и Берлине), провел много работ по электрическим волнам и электромагнитной теории света. Большой известностью пользовался его «Курс оптики».

24. Ремельт Сиссинг — профессор, оптик (работал в Амстердаме), специально занимался явлением Керра.

25. Питер Зееман (1865—1943) — профессор (работал в Амстердаме), в 1897 г. открыл явление расщепления спектральных линий в магнитном поле, названное его именем.

26. Дэниэл Ши — профессор (работал в Гарвардском университете и в Вашингтоне).

27. Гейнрих Рубенс (1865—1922) — профессор (работал в Берлине), товарищ П. Н. Лебедева по лаборатории Кундта, провел выдающиеся работы по инфракрасным лучам, тепловому излучению и пр.

28. Эдвин Холл — американский ученый, открыл явление действия магнитного поля на электрический ток в металлах, названное его именем.

29. В. А. Ульянин (1863—1930) — профессор (работал в Казани), известен исследованиями селена, фотоэлементов и теплового испускания неметаллов, учился у Кундта в Берлине.

30. Д. П. Коновалов (1856—1929) — горный инженер, выдающийся химик, академик, президент Главной палаты мер и весов, (работал в Страсбурге в 1881 г.).

31. Владислав Натансон — профессор (работал в Кракове). Работы по теории дисперсии, случайному двойному преломлению и др. Учился в Петербургском университете и в Дерпте (Юрьеве).

32. Б. В. Станкевич (1860 —) — профессор (работал в Варшаве, после ухода П. Н. Лебедева из университета — в Москве).

33. В. С. Щегляев (1857—1919) — профессор МВТУ, учитель Лебедева.

5. Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы

История работы такова. Во время своего прощального доклада на коллоквиуме в Страсбурге Лебедев выступил с некоторым программным заявлением *, ставшим в дальнейшем основным планом его научной работы. На первое место была поставлена работа над увеличенной «моделью» молекулы — резонатором молярных размеров. П. Н. осуществил этот замысел в трех работах — по электромагнитным (Ann. d. Phys., т. 52, стр. 621—640, 1894), гидродинамическим (Ann. s. Phys., т. 59, стр. 116—133, 1896) и акустическим резонаторам (Ann. d. Phys., т. 62, стр. 158—173, 1897). В 1899 г. Лебедев напечатал их отдельной брошюрой на русском языке (стр. 1—64) и представил ее как диссертацию на степень доктора физико-математическому факультету МГУ. При этом он снабдил ее «Введением», отсутствующим в немецком издании; в нем П. Н. высказывает мысли, весьма близкие к тем, которые составляли сущность его «Программы». С другой стороны, перевод, вообще очень близкий к первоначальному немецкому тексту, представляет по сравнению с последним некоторые сокращения. А именно, в русском тексте отсутствуют: в гл. I — отделы V и VI; в гл. II — отдел 11 § 2, а также отделы V и VI; наконец, в гл. III — отделы IV и V. Это, прежде всего, теоретические соображения и «заключения» по каждой главе; затем — описание метода регулировки скорости (стабилизации, как мы сказали бы теперь) и, наконец (в последней главе), «Примечания, касающиеся электромагнитных волн». Эти разделы переведены с немецкого языка учениками П. Н. для первого издания его Сочинений (1913) и включены в данное издание. Подлинные рукописи в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, №№ 13, 19 и 21 (на немецком языке); 22 (на русском языке).

1. Август Риги (1850—1920) — весьма крупный итальянский ученый, профессор (работал в Палермо, Болонье), известен исследованиями по фотоэффекту, коротким волнам и пр. Автор (совместно с Гарбассо) первого курса телеграфии без проводов.

2. Антонио Гарбассо — ассистент Риги, а затем профессор (работал во Флоренции), писал по вопросам теоретической спектроскопии.

3. Оливер Лодж (1851—1940) — ректор университета в Бирмингэме, известен по работам в области коротких электрических волн.

4. Э. Кон — см. прим. ред. 19 к ст. 1; П. Друде — см. прим. ред. 23 к ст. 4.

5. Вильгельм Бьеркнес (1862—1951) — профессор (работал в Стокгольме), известен рядом работ, выяснивших явление резонанса в сильно затухающих системах.

6. Рихард Биркеланд (1867—1917) — профессор (работал в Христиании), товарищ П. Н. Лебедева по лаборатории, имел работы по метровым электрическим волнам, впоследствии известен как создатель метода получения азота из воздуха с помощью дуги высокого напряжения.

---

* Оно хранится в Архиве АН СССР, ф. 293, опись 1.

7. Антон Обербек (1846—1900) — исследователь связанных колебаний маятников, а также электрических колебаний в догерцевский период.

8. Макс Вин — профессор (работал в Данциге), автор многочисленных исследований по акустике и особенно по связанным колебаниям.

9. Карл Антон Бьеркнес (1825—1903) — профессор (работал в Христиании), автор знаменитых гидродинамических исследований о взаимодействии колеблющихся тел, погруженных в жидкость.

10. Чарльз Бойс (1855—1932) — талантливый физик, впоследствии руководитель газовой компании в Лондоне, изобрел кварцевые нити, микрорадиометр, исследовал постоянную силы тяжести.

11. Бриско — данных нет.

12. Уилльям Уатсон — провел несколько работ по вращению плоскости поляризации, определению магнитной напряженности Земли в абсолютных мерах и пр., сотрудничал с Бойсом.

13. И. Клеменчич — см. прим. ред. 1 к ст. 1.

14. Эдуард Саразэн (1843—1917) — швейцарский ученый, вместе с Л. Делярибом открыл в 1890 г. явления «множественного резонанса», т.е. отклика сильно затухающей системы на широкий диапазон колебаний.

15. Люсьен Делярив — см. предыдущее примечание. Представитель «династии» женевских ученых.

16. Пранер Ренэ Блондло — профессор (работал в Нанси), выполнил работы по скорости распространения герцевских волн и X-лучей; он же сделал псевдооткрытие «N-лучей».

17. Альфред Перо — профессор-спектроскопист (работал в Марселе), занимался изучением распространения электрических колебаний в проволоках.

18. Аугуст Теплер (1836—1912) — профессор (работал в Дрездене), создатель многих демонстрационных опытов, в частности по электрическим колебаниям.

19. Иозеф Гейтлер (1870—1923) — профессор (работал в Праге), занимался главным образом изучением распространения электрических волн в проволоках.

20. Леон Фуко (1819—1868) — академик (работал в Париже), автор метода вращающегося зеркала для определения скорости света, исследований индукционных токов в протяженных телах и др.

21. Н. Е. Жуковский — см. прим. ред. 19 к ст. 1.

22. В. Дворжак — см. прим. ред. 3 к ст. 4.

23. Жюль Гюйо (1807—1872) — парижский врач, в 1870 г. опубликовал работу о пондеромоторном действии акустических волн.

24. Огюстэн Бертэн (1818—1884) — профессор (работал в Страсбурге, Париже), автор различных работ по многим разделам физики.

25. Эрнст Гримзель (1861—1914) — создатель большого числа демонстрационных приборов.

26. Август Стро — член Общества британских телеграфных инженеров, выступал на Парижском Конгрессе физиков с докладом о проверке теории Бьеркнеса опытами в воздухе.

6. Прибор для проложения акустических колебаний

В основе этой работы лежит доклад-демонстрация, прочитанный на IX Съезде естествоиспытателей и врачей в декабре 1893 и январе 1894 г. Впоследствии Лебедев опубликовал его с дополнениями в ЖРФХО, часть физ., т. 26, стр. 290—293, 1894.

Текст дан по вышеуказанной журнальной статье. Подлинная рукопись Лебедева — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, 10.

1. Леон Скотт — изобретатель фонаутографа.

2. Анри Риголло — профессор (работал в Лионе), занимался в основном актинометрией.

3. Исидор Фрелих — профессор (работал в Будапеште).

4. Рудольф Кениг (1832—1901) — конструктор многих акустических приборов.

5. В. И. Чибисов — работал механиком в лаборатории Лебедева, позже владетель небольшого, передового для своего времени электротехнического предприятия в Москве — «Стручков и Чибисов».

7. О двойном преломлении лучей электрической силы

В 1895 г. почти одновременно напечатана на немецком языке в «Видемановских анналах» (т. 56, стр. 1—17) и на русском языке в ЖРФХО (часть физ. т. 27 (1), стр. 213—220. В русском тексте отсутствует раздел «Дополнения», содержащий главным образом практические указания. Этот раздел переведен учениками П. Н. для первого издания его сочинений (1913). Здесь точно воспроизводится этот текст.

Подлинные рукописи П. Н.— в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, 14 (на немецком языке) и 15 (на русском языке).

По поводу этой рукописи существует любопытное письмо П. Н. к его бывшему учителю Кольраушу. В нем Лебедев как бы оправдывает свое отступление от «Программы», вызванное опытом, приобретенным при работе над пондеромоторным действием герцевских волн на резонаторы (ст. 5, гл. I) и при проведении демонстраций герцевских волн на IX съезде естествоиспытателей и врачей.

Данная работа положена в основу трудов многих учеников П. Н. А. Р. Колли, В. И. Романова, Н. К. Щодро, В. К. Аркадьева и др.

1. Оливер Лодж — см. прим, ред. 3 к стр. 5. Там же об Августе Риги прим. 1.

2. Карл Мак — профессор (работал в Геттингене). Работы главным образом по метеорологии, опубликовал две работы по двойному преломлению герцевских волн.

3. В. А. Бернацкий (1869—1916) — профессор Варшавского политехнического института, ученик Кундта (по Берлину), занимался изучением двойного преломления льда для герцевских волн.

4. Герман Шпренгель (1834 —) — химик, ученый и заводчик (работал в Лондоне), изобрел воздушно-водяной насос (приписываемый Бунзену) и вакуумный ртутный насос принципиально того же устройства — самый совершенный до появления насосов Гэде и Ленгмюра.

8. О работе индукториев и камертонов

Впервые напечатана на немецком языке в «Видемановских анналах», т. 58, стр. 408—409, 1896. На русском языке в переводе учеников Лебедева в «Собрании сочинений» 1913 г. Подлинная рукопись — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 17.

1. Необходимо заметить, что эти лампочки были угольные, с сопротивлением около 350 *ом* каждая.

9. Об открытых Рентгеном X-лучах

Впервые напечатана в журнале «Русская мысль» за 1896 г. (майский номер, стр. 150—158). Подлинная рукопись — в Архиве АН, ф. 293, оп. 1, № 16. Представляет собой дополненный автором текст его публичной лекции, прочитанной на Высших женских курсах. Редакция первого издания «Сочинений» Лебедева (1913) дополнила первоначальный текст несколькими снимками, которые Лебедев демонстрировал во время лекции (это одни из первых в России рентгенографий). В дальнейшем Лебедев, заинтересовавшись X-лучами, исследовал их селективное поглощение, но оставил эти исследования незаконченными (в последующем эту рабту завершил Баркл).

1. Уилльям Крукс (1832—1919) — знаменитый английский физик, исследователь катодных лучей, открыл таллий, изобрел спинтарископ.

2. Шарль Анри — специалист по физиологии органов ощущения, занимался изучением свойств X-лучей (1895).

3. Болеслав Невенгловский — математик, парижский ученый, инспектор Академии.

4. Анри Беккерель (1852—1908) — академик (работал в Париже), при опытах над X-лучами открыл радиоактивность (1895).

5. Одна из первых гипотез о происхождении X-лучей была выдвинута (теперь мы знаем, что она была неправильной) А. Пуанкаре, который предположил, что они не зависят прямым образом от катодного потока, а зарождаются от флуоресценции стекла. Стараясь подтвердить это, хотя и неправильное, представление, Беккерель пришел к открытию радиоактивности. Поверил в это ошибочное объяснение происхождения X-лучей и П. Н., отзвуком чего и является его неправильное утверждение, содержащееся в этом разделе и в примечании.

6. При жизни П. Н. Лебедева известными кратчайшими ультрафиолетовыми волнами были волны Шумана ($\lambda = 0{,}1\ \mu$).

7. Гемфри Дэви (1778—1829) — знаменитый химик, учитель Фарадея.

10. П. Лейберг. Экспериментальное исследование коэффициента затухания акустических резонаторов

Эта небольшая статья представляет собой реферат, написанный Лебедевым (он подписал его: P[ete]r L[ebede]w) о первой работе, законченной под руководством П. Н. его учеником П. Б. Лейбергом. Напечатана (на немецком языке) в реферативном журнале «Beiblättern den Annalen», т. 20, стр. 961—963, 1896. На русском языке здесь появляется впервые. Подлинная рукопись — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 18.

1. П. Б. Лейберг (1874—1938) — первый ученик П. Н., закончивший в его лаборатории предложенную ему работу.

2. Макс Вин — см. прим. ред. 8 к ст. 5; Бьеркнес Вильгельм — то же, 5, к ст. 5.

11. Экспериментальные работы А. Г. Столетова

Напечатана в «Трудах Отд. физ. наук ОЛЕАЭ», т. 9, вып. 2, стр. 54—59, 1896. Подлинная рукопись не сохранилась. Как показывает подстрочное примечание автора, статья воспроизводит речь, произнесенную 27 ноября 1896 г., ровно через полгода после кончины А. Г. Столетова.

1. И. Ф. Усагин (1855—1919) — препаратор (а потом старший лаборант) физической лаборатории МГУ. Превосходный демонстратор; участник упомянутых исследований А. Г. Столетова. Один из изобретателей трансформатора.

2. То, что здесь называется намагничением, по современной терминологии было бы наименовано магнитной индукцией; намагничивающая сила — магнитная напряженность.

3. Леонард Вебер (1848—1919) — профессор (работал в Бреславле и Киле), предложил в 1877 г. теорию намагничения железа на основе представления о наличии внутри железа отдельных магнитиков.

4. Генри Вильде (вернее Уайлд) (1833—1919) — ученый (работал в Манчестере), специалист по земному магнетизму; его магнетометр описан в 1899 г.

5. Вернер Сименс (1816—1892) — инженер и фабрикант, автор многочисленных изобретений и патентов (из коих многие вряд ли принадлежат ему самому).

6. Ладд — данных нет.

7. Уилльям Айртон (1847—1909) — физик (работал в Лондоне), создал много приборов и способов электрических измерений.

8. Джон Перри (1856—1920) — профессор, занимался электротехникой, сотрудник Айртона (работал в Токио и в Лондоне).

9. Тоши Шида — профессор, занимался геофизикой (работал в Киото).

10. Э. Видеман — см. прим. ред. 4 к ст. 1; Галльвакс — прим. ред. 19 к ст. 1.

11. Герман Эберт (1861—1913) — профессор, известный специалист по электрическим измерениям (работал в Мюнхене).

12. Генрих Гейслер (1815—1879) — немецкий стеклодув, весьма известный своими, порой непревзойденными, изделиями («гейслеровы трубки», воздушный насос Гейслера).

13. Уилльям Крукс — см. прим. ред. 1 к ст. 9.

12. Проложение с оборотною призмою

Происхождение этой статьи методического характера (а также следующих двух) таково: в 1900 г. профессор Варшавского университета П. А. Зилов начал издавать журнал «Физическое обозрение» и просил физиков того времени давать в журнал статьи, обзоры, заметки и т. п. Это начинание встретило горячую поддержку со стороны П. Н., который поместил в «Физическом обозрении» с 1900 по 1910 г. 7 статей разного объема и значения, из них некоторые — весьма фундаментальные. Посвящение знаменитому препаратору физического кабинета МГУ И. Ф. Усагину, с которым молодой еще тогда лектор Лебедев вел постоянные споры об использовании оборотной призмы при проекции опытов на экране. Статья напечатана в «Физическом обозрении», т. 1, стр. 33—35, 1900. Подлинные рукописи 11, 12, 13 и 14-й статей утрачены.

1. Эдмонд Беккерель (1820—1891) — описал оборотную призму.

2. Вернард Ванах (1867 —) — астроном (работал в Дерпте, Пулкове и Потсдаме).

13. Жар вольтовой дуги

Эта заметка напечатана в «Физическом обозрении», т. 1, стр. 86, 1900.

14. Способы получения высоких температур

Напечатана в «Физическом обозрении», т. 1, стр. 90—109, 1900.

Как показывает подстрочное примечание автора, статья написана по конспекту публичной лекции, прочитанной в конце 1899 г.

1. Фон Велльсбах Карл Ауер (1858—1929) — химик, специалист по редким землям, крупнейший изобретатель (в газовом освещении — так называемый «ауэровский чулок»).

2. Томас Друммонд (1797—1840) — моряк, изобретатель.

3. Иоганн Гольдшмидт (1861—1923) — химик, заводчик, изобретатель алюминотермии и термитов.

4. Анри Муассан (1852—1907) — французский химик, профессор, академик (работал в Париже), изобретатель «печи Муассана», искусственных алмазов и мн. др.

5. Каулз — никаких данных нет.

15. Максвелло-Бартолиевые силы давления лучистой энергии

Представляет собой доклад П. Н. на Международном Конгрессе физиков в августе 1900 г. В течение предшествующих двух лет Лебедев занимался этой темой—основным пунктом его жизненной программы. К концу 1899 г. предварительные результаты были получены и сообщены Ваадтскому естественно-историческому обществу. К сожалению, от этого сообщения сохранилась только протокольная запись, составленная не самим Лебедевым; текст ее см. в прим. ред. 11 к ст. 18. Доклад на конгрессе был прочитан на французском языке, по переводу, сделанному Брюном с немецкого текста Лебедева. Напечатан на русском языке в ЖРФХО, часть физ., т. 32, стр. 232, 1900, на французском языке (фактически несколько позже) — в «Трудах Съезда» («Rapports presente's»), т. 2, стр. 133—140, помечено 1900 г. Вышеуказанная протокольная запись и две данные публикации закрепляют безусловный приоритет Лебедева в решении труднейшей по тому времени задачи доказательства существования светового давления и его измерения.

Текст дан по статье в ЖРФХО. Подлинная рукопись на русском языке — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 25; на французском языке — там же, № 26.

1. Бартоли — см. прим. ред. 1 к ст. 2.

16. Силы Максвелла — Бартоли, обусловленные давлением света

Автореферат, помещенный в «Beiblätterzu der Annalen» и подписанный P(ete)r L(ebede)w. Русский перевод здесь дается впервые. Подлинная рукопись немецкого текста не сохранилась. Встречающиеся имена см. в примечаниях к ст. 15.

17. По поводу заметки проф. Д. А. Гольдгаммера

Представляет собой ответ П. Н. Лебедева на замечания, сделанные профессором Д. А. Гольдгаммером по поводу статьи 15 настоящего собрания.

Статья П. Н. Напечатана в ЖРФХО, часть физ., т. 33, стр. 343, 1901, и здесь перепечатывается впервые. Подлинная рукопись Лебедева не сохранилась.

18. Опытное исследование светового давления

Классическое исследование Лебедева по вопросу о световом давлении на твердые тела напечатано впервые в ЖРФХО, часть физ., т. 33, стр. 53—75. Статья была перепечатана тогда же в ряде иностранных журналов, а впоследствии три раза на русском языке; вызвала большое число печатных откликов. Подлинная рукопись Лебедева (на немецком языке) — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 45.

1. Оливер Хевисайд — известный физик, один из продолжателей дела Максвелла.

2. Бартоли — см. прим. ред. 1 к ст. 2; Э. Кон —19 к ст. 1; П. Друде — 23 к ст. 4; У. Крукс — 1 к ст. 9; А. Риги — 1 к ст. 5; Ф. Кольрауш — 2 к ст. 1; Г. Рубенс — 27 к ст. 4; Ф. Целльнер — 6 к ст. 2; О. Бертэн — 24 к ст. 5.

3. Шарль Гильом (1861—1938) — директор Бюро мер и весов в Севре, специалист главным образом по вопросам точных измерений и систем единиц.

4. Христиан Лонгомонтанус (1564—1647) — сотрудник Тихо Браге, профессор (работал в Копенгагене).

5. Жан Жак де Меран (1678—1771) — член и непременный секретарь Парижской Академии, известен как редактор-издатель трудов Академии.

6. Шарль Франсуа Дюфе (1698—1739) — особенно известен трудами по электричеству; член Парижской Академии.

7. Эдвард Никольс — крупный американский физик, известен работами по люминесценции, излучению, световому давлению и др.

8. Кнут Ангстрем (1857—1910) — профессор, академик (работал в Упсале, Стокгольме), выдающийся специалист по измерению излучения (в его честь $\lambda = 0{,}1\ m\mu$ названа ангстремом).

9. Артур Шустер (1851—1934) — немецкий ученый, оптик, профессор (работал в Манчестере), известна его теория природы белого света.

10. Поль Гарб — профессор, сотрудник Бертэна по ряду работ (работал в Пуатье).

11. Протокольная запись о выступлении Лебедева на этом заседании следующая. «Г-н П. Лебедев, профессор физики Московского университета, сообщает Обществу о результатах своих первых исследований, относящихся к давлению света.

Существование давления, оказываемого пучком световых лучей на поглощающую и отражающую поверхность, является следствием электромагнитной теории света; на него было указано Максвеллом.

Значение этого давления, согласно теории, должно быть весьма малым: 0,3 *мг* на *м*^{2} черной поверхности. Г-ну Лебедеву удалось осуществить прибор, при помощи которого можно его (давление.—*Ред.*) измерить, и результат первых опытов согласуется

с предсказанием теории. Г-н Лебедев приводит далее важные следствия, вытекающие из теории давления света для объяснения деформаций, которые испытывают кометы при их движении в пространстве (см. заметку г-на Лебедева)» (Из отчета о заседании Общества естествоиспытателей в Лозанне кантона Во, 3 мая 1900 г.).

12. Филипп Ленард (1862—1947) — профессор (работал в Бреславле, Гейдельбарге, Киле), выдающийся исследователь фотоэффекта, катодных лучей, люминесценции, впоследствии один из вождей реакции в Германии.

13. Макс Вольф (1863—1932) — астрофизик, профессор в Гейдельберге, работал в сотрудничестве с Ленардом.

14. Жак Арсен д'Арсонваль (1851—1940) — медик, физик, избран академиком (работал в Париже), известны токи Д'Арсонваля, гальванометр и т. д.).

15. Фердинанд Курльбаум — профессор, специалист по излучению черного тела (работал в Берлине), и сотрудник Государственного физико-технического института.

16. Фридрих Мартенс (1873 —) — приват-доцент в Берлине, научный сотрудник фирмы «Шмидт и Генш», известен точными оптическими измерениями и конструкциями многих оптических приборов (спектрофотометр Кенига — Мартенсена, боковое освещение шкал на зеркальном стекле и др.). О Велльмане (по-видимому, изобретателе такого освещения шкалы) данных нет.

17. Георг Кальбаум (1853—1905) — профессор (работал в Базеле), владелец химической фабрики, выпускавшей реактивы исключительной чистоты; известен также воздушный насос Кальбаума.

18. Матиас Кантор — биографических данных нет.

19. Эрнст Каген (1851—) директор Государственного физико-технического института, в сотрудничестве с Рубенсом провел несколько выдающихся исследований (гальванометр Кагена — Рубенса, изучение отражательной и испускательной способности металлов в инфракрасной области и др.).

19. Исследование силы светового давления

Автореферат за подписью P[ete]e L[ebede]w напечатан (на немецком языке) (Fortschritte d. Phys., т. 57, стр. 5, 1901). Русский перевод публикуется впервые. Подлинная рукопись Лебедева отсутствует.

20. Шкала электромагнитных волн в эфире

Одна из лучших популярных статей П. Н., напечатана в «Физическом обозрении» т. 2, стр. 49—60 и 217—230, 1901.

Подлинная рукопись Лебедева не сохранилась.

1 Джемс Юинг (1855—1935) — профессор (работал в Токио и Эдинбурге), известный исследователь «функции намагничения железа».

2. Никола Тесла (1857—1943) — сербский ученый, изобретатель, в Америке занимался вопросами теории электричества («токи Тесла — д'Арсонваля»):

3. Ныне этот предел превзойден В. П. Вологдиным (1881—1953).

4. Г. Гельмгольц — см. прим. ред. 19 к ст. 1; О. Лодж — 3 к ст. 5; И. Клеменчич — 1 к ст. 1; Г. Рубенс — 27 к ст. 4; Лэнглей С. — 2 к ст. 2; Беккерель А.— 4 к ст. 9.

5. Беренд Феддерсен (1832—1919) первый экспериментально исследовал электрические колебания (1859).

6. Гейнрих Румкорф (1803—1877) — механик (работал в Париже), знаменит изобретением названного его именем индукционного прибора.

7. Н. Н. Шиллер (1848—1910) — ученик Столетова и Гельмгольца, исследовал колебания в румкорфовой катушке, впоследствии профессор (работал в Киеве), директор Харьковского технологического института, известен по работам в области классической термодинамики, автор принципа Шиллера — Каратеодори.

8. Р. А. Колли (1845—1891) ученик Столетова и Гельмгольца, впоследствии профессор (работал в Казани, Москве), занимался изучением колебаний в катушке Румкорфа.

9. Луи Декомб — физик (работал в Париже), занимался изучением электрических колебаний.

10. Джон Траубридж (1843—1923) — профессор (работал в Кэмбридже); занимался изучением электрических колебаний.

11. Уилльям Дюэйн — профессор (работал в Колорадо), впоследствии известен работами по ионам в газах и пр.

12. Эрих Маркс известен работой по установлению скорости распространения X-лучей (по методу Блондло), издавал «Handbuch der Radiologie».

13. Гуильельмо Маркони (1874—1937) занимался вопросами беспроволочного телеграфа. П. Н. не упоминает здесь имени настоящего изобретателя радио А.С. Попова.

14. Джагадис Чандер Бозе (1858—1937) — профессор (работал в Калькутте), исследователь электрических колебаний.

15. Антон Лампа — профессор (работал в Вене и Праге), соперничал с П. Н. Лебедевым по исследованию коротких электрических волн ($\lambda = 4$ *мм*), применял для этой цели когерер.

16. В двадцатых годах нашего века трудами наших соотечественниц А. А. Глаголевой-Аркадьевой и М. А. Левитской область электрических колебаний была значительно расширена в сторону малых длин волн.

17. В настоящее время пользуются термином не микромикрон, а миллимикрон, с обозначением *ммк*.

18. Иозеф Фраунгофер (1787—1826) — выдающийся оптик.

19. Фридрих Нобарт (1806—1881) — механик университетской лаборатории в Грейфсвальде.

20. Льюис Рутерфорд — астроном-любитель, конструктор.

21. Генри Роленд (1848—1901) — профессор (работал в Балтиморе), известен как автор трудов по магнитному действию конвективных токов, исследователь спектра Солнца и др.

22. Современная точность определения длины волны еще выше и достигает 10^{-7}.

23. Виктор Шуман (1841—1913) — ученый-самоучка, создатель вакуумной спектроскопии.

24. В начале XX в. наиболее короткие волны, исследуемые оптическими методами, были обнаружены Лайманом (профессор, работал в Кэмбридже, Массачусетс), их длина 50 *ммк*.

25. Уилльям Абней (1843—1920) — член Королевского общества, известный исследователь Солнца, оптик, колориметрист и фотограф.

26. Мачедонио Меллони (1798—1854) — профессор (работал в Парме и Неаполе), известен исследованиями по излучению и поглощению телами лучистой энергии.

27. Рубенс и Вуд обнаружили и измерили волны с длиной до 300 *мк*. См. статью П. Н. «Успехи физики в 1911 г.».

28. К 1912 г. (после смерти Лебедева) относится знаменитая работа Лауэ, Фридриха и Книппинга, которые доказали, что X-лучи суть ультраультрафиолетовые волны, с длиной волны в тысячи раз короче видимых, и дали способ точного измерения этой величины.

21. Термоэлементы в пустоте и т. д.

Напечатана в «Annalen der Physik», стр. 209—213, 1902. Впервые на русском языке в «Собрании сочинений» 1913 г., в переводе учеников П. Н. Здесь текст соответствует этому изданию. Подлинная рукопись — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 28.

Работа явилась итогом глубокого рассмотрения газовых процессов, которыми Лебедев занимался в связи с изучением светового давления. Эта работа положила начало двум диссертациям (П. П. Лазарева и А. К. Тимирязева), выполненными в лаборатории П. Н.

1. Кундт см. статью 4; Э. Варбург — см. прим. ред. 6 к ст. 1; М. Меллони — 26 к ст. 20; И. Клеменчич — 1 к ст. 1; Г. Кальбаум — 17 ст. 18.

2. Вилли Вин (1864—1928) — профессор (работал в Вюрцбурге и Мюнхене), исследователь в области термодинамики излучения (формула Вина, «закон смещения» Вина), положительных лучей и др.

3. Кемпф-Гартман — приемный сын Гартмана, одного из владельцев фабрики электроприборов «Гартман и Браун» (указание П. Н. Лебедева, других данных нет).

4. Леопольдо Нобили (1784—1835) — профессор (работал во Флоренции), изобрел мультипликатор и астетическую стрелку, занимался (но без особого успеха) явлениями электромагнитной индукции и т. д.

5. Фридрих Гефнер-Альтенек (1845—1904) — известный электротехник-конструктор (изобретатель барабанного якоря динамомашины, дифференциальной лампы и др.). В 1883 г. предложил «нормальную свечу», осуществляемую специальной лампочкой.

22. Физические причины, обусловленные отступлением от гравитационного закона Ньютона

Статья представляет собой доклад, прочитанный 4 августа 1902 г. на съезде Немецкого астрономического общества. По существу она представляет возврат к тем соображениям, которые молодой Лебедев развивал в своей работе 1891 г. Только теперь, после доказательства существования и измерения светового давления, он может говорить о последнем не как о гипотезе, а как о несомненно существующем факте. Разъяснению этого вопроса во многом способствовала его работа о действии волн на резонаторы. Между тем после не вполне верно понятой работы К. Шварцшильда световое давление как космический фактор стало подвергаться некоторому сомнению; необходимо было исправить возникшие ошибочные воззрения.

Статья появилась на немецком языке (Physikal, Zeitschr. т. 4, стр. 15—18, 1903), на русском языке (Физическое обозрение, т. 4, стр. 15—18, 1903) и несколько ранее в английском переводе с некоторыми сокращениями (Astrophys. Journ, т. 16, стр. 155—161, 1902).

Подлинные рукописи Лебедева (на немецком языке) — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 29; русский подлинник не сохранился.

1. А. Бартоли см. прим. ред., 1 к ст. 2; Ф. А. Бредихин — 5 к ст. 2; Э. Видеман — 4 к ст. 1; В. Дворжак — 3 к ст. 4; Ш. Дюфэ — 6 к ст. 18; Э. Ломмель —11 к ст. 4; Ж. Ж. де Меран — 5 к ст. 18; Э. Никольс — 7 к ст. 18; Ф. Целльнер — 6 к ст. 2.

2. Интересно, что Ломоносов, противник теории истечения, выдвигал против нее соображение: если бы эта теория была справедлива, то все тела солнечной системы были бы из нее вытолкнуты силами светового давления.

3. Генри Кэвендиш (1731—1810) — знаменитый исследователь гравитационной постоянной (1798).

4. Ольберс Гейнрих (1758—1840) — врач и астроном-любитель, исследователь комет.

5. Фридрих Бессель (1784—1846) — профессор астрономии (работал в Кенигсберге), его работы — бесселевы функции, ряд оптических изысканий, способ Бесселя для исследования аномалий земного тяготения и мн. др.

6. Герхардт Карл Шмидт (1865 —) — профессор (работал в Эрлангене), исследователь люминесценции, действия катодных лучей, радиоактивности и др.

7. Гордон Ферри Гулль (вернее: —) — работал с Никольсом по световому давлению.

8. Джордж Фитцджеральд (1851—1901) — профессор (работал в Дублине), в 1883 г. в мало доступном журнале опубликовал статью о кометных хвостах, ему же (вместе с Г. А. Лоренцом) принадлежит формулировка условий на поверхности в максвелловской теории.

9. Сванте Аррениус — создатель теории электрической диссоциации в растворах, интересовался ролью светового давления в космосе (его работы— «Космическая физика», «Происхождение миров»).

10. Карл Шварцшильд (1873—1916) — профессор астрономии (работал в Геттингене, а затем был директором обсерватории в Потсдаме), известен и как фотограф («константа Шварцшильда»).

23. Об одном изменении опыта Роуленда-Гильберта

Работа принадлежит к разряду тех весьма многочисленных и всегда неудачных по результатам попыток заметить какое-либо влияние эфира на движение Земли, которые предпринимались до появления теории относительности. Необходимо заметить, что уже в первой фразе этой статьи Лебедев связывает движение небесных тел (через эфир) с возникновением токов и магнитных полей в этих телах(см. ниже ст. 38).

П. Н. с ранних лет интересовался всеми работами Роуленда: еще на школьной скамье он в своих дневниках много раз упоминает имя «Роланда», как он тогда его произносил.

Статья напечатана в «Annalen der Physik», т., 11, стр. 442—444, 1903. На русском языке впервые — в «Собрании сочинений» 1913 г. в переводе учеников П. Н. Подлинная рукопись — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 30.

1. Гильберт — ученик Роуленда, других данных нет.

2. Г. Роуленд — см. прим. ред. 21 к ст. 20.

24. Об измерении температуры солнечных пятен

Огромная значимость работ и докладов П. Н. по световому давлению (ст. 2, 15, 16, 18, 19, 22) побудила сотрудников Пулковской обсерватории привлечь его в состав «Солнечной» комиссии. П. Н. принимает в трудах последней деятельное участие; так появляются статьи (24, 25 и 28), неоднократные выступления, зафиксированные в протоколах Комиссии, прибор, изготовленный по проекту П. Н., и др.

Статья напечатана в Приложении XI к «Протоколам заседаний «Солнечной» комиссии» за 1905 г., стр. 33—34.

Подлинная рукопись не сохранилась.

1. Отношение времен экспозиций, необходимых для получения одинакового зачернения, не равно обратному отношению яркостей объектов (так называемое «явление Шварцшильда»).

2. Ваннер — ученик Пашена, изобретатель первого оптического пирометра.

25. Об измерении спокойствия и прозрачности атмосферы во время солнечных наблюдений

Также доклад на заседании русского отделения Международной комиссии по исследованию Солнца. Приложение IX к «Протоколам заседаний «Солнечной» комиссии» от 22 и 24.IV 1905 (стр. 33—34). Рукопись Лебедева — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1.

26. Силы светового давления

Обзорная статья, напечатанная («Jahrbuch. d. Radioaktivität u Elektronik», стр. 305—313, 1905, недолго просуществовавший журнал, помещавший обзоры, написанные специалистами). Подлинная рукопись не сохранилась. На русском языке появляется впервые.

1. Аррениус — см. прим. ред. 9 к ст. 22; Бартоли — 1 к ст. 2; В. Вин — 2 к ст. 21; Гулль — 7 к ст. 22; Друде — 23 к ст. 4; Кон — 19 к ст. 1; Крукс — 1 к ст. 9; Лодж — 3 к ст. 5; де Меран — 5 к ст. 18; Никольс — 7 к ст. 18; Дюфе — 6 к ст. 18; Хевисайд— 1 к ст. 18; Шварцшильд — 10 к ст. 22.

2. Джозеф Лармор (1857—1942) — профессор (работал в Кэмбридже), автор выдающихся работ по различным разделам теоретической физики («прецессия Лармора» и мн. др.).

3. Иозеф Стефан (1835—1893) — профессор (работал в Вене), автро «закона Стефана — Больцмана», имел выдающиеся для своего времени работы по распространению электрических колебаний в проволоках, работы по вопросам упругости и др.

4. Тольвер Престон — английский инженер в области телеграфии, имел много работ по вопросам оптики.

5. Джон Пойнтинг (1852—1914) — профессор (работал в Бирмингэме), автор известной «теоремы Пойнтинга» и важных работ по световому давлению.

6. Отто Луммер (1860—1925) — профессор (работал в Бреславле), специалист по теории излучения («кубик Луммера» и др.).

7. Эрнст Прингсгейм (1859 — 1917) — специалист по теории черного излучения и излучения газов, частый сотрудник Луммера.

8. В. Я. Альтберг (1877—1942) — ученик П. Н., автор двух превосходных работ по звуковому давлению и по ультразвуку. Работал у Ленарда, у Голицина и Фридмана.

9. Балфур Стюард (1828—1887) —шотландский ученый. Работал преимущественно по земному магнетизму, солнечным пятнам и др. Написал много популярных статей.

10. Макс Тизен — сотрудник Государственного физико-технического института. (Германия).

11. Макс Абрагам (1875—1922) — профессор (работал в Милане); выдающийся специалист по теории электронов (теория «твердого» электрона), автор известного курса теории электричества (ныне переделанного Беккером).

27. Успехи акустики за последние десять лет

Статья напечатана (только на русском языке) в «Физическом обозрении», т. 6, стр. 1—10 и 140—150, 1905, и, как показывает подстрочное примечание, представляет собой лекцию, относящуюся к специальному курсу «Задачи современной физики», давая хорошее понятие о характере всего курса. Подлинной рукописи не сохранилось.

1. Карл Штумпф — физик и психолог, профессор (работал в Вюрцбурге, Праге, Галле, Мюнхене и Берлине). Мейер — сотрудник Штумпфа, данных о нем нет.

2. Альтберг см. прим. ред. 8 к ст. 26, М. Вин — 8 к ст. 5; Гельмгольц — 19 к ст. 1; Квинке — 8 к ст. 1; Кемпф-Гартман — 3 к ст. 21; Кундт — см. ст. 4; Лейберг см. прим. ред. 1 к ст. 10.

3. Рудольф Кениг (1832—1901) — конструктор большого числа акустических приборов.

4. Макс Томас Эдельман (1845—1913) — профессор (работал в Мюнхене), фабрикант завода физических приборов.

5. Файфер Гальтон — известен только как изобретатель «свистка Гальтона».

6. Людимар Герман (1838—1914) — физиолог, специалист по физиологии органов чувств, известен анализом гласных, проверкой гельмгольцевой теории слуховых ощущений и др.

7. Артур Вебстер — профессор (работал в Уорчестре), провел ряд работ по теории колебаний.

8. Август Рапс — специалист по акустике, а впоследствии директор предприятия Сименса — Гальске, известен «насос Рапса».

9. Жюль Жамен (1818—1886) — профессор, академик (работал в Париже), известен многочисленными оптическими исследованиями («интерферометр Жамена» и др.).

10. Первое объяснение звукового давления было дано Н. П. Кастериным в докладе на Съезде естествоиспытателей и врачей (Ленинград, 1901), но он запоздал с публикацией, и приоритет принадлежит Рэлею.

11. Виктор Двельшауверс-Дери — профессор (работал в Лиеже по газам, Х-лучам и др).

12. Берген Дэвис — профессор (работал в Нью-Йорке), работы в разных разделах, физики (теория колебаний, Х-лучи, газовый разряд и пр.).

13. Томас Ролинсон (1792—1882) — астроном и метеоролог (работал в Дублине), директор обсерватории в Армаге (Ирландия).

14. Виктор Реньо (1810—1878) — знаменитый специалист по тепловым измерениям (работал в Париже, Севре).

15. О Бюртоне, Верте, Годфри, Лерде, Лоу, Мюллере, Нардорфе, Нейренефе, Шабо, и Эньяне данных нет.

16. Поль Виель — изобретатель бездымного пороха, известен работами по фазам и баллистике.

17. Н. А. Гезехус (1845—1922) — профессор Ленинградского технологического института, провел многочисленные работы в разных областях физики, в том числе по теории электризации при трении.

18. Жюль Виолль (1841—1923) — профессор, академик (работал в Париже), работы по актинометрии, тепловому излучению, акустике. Теодор Вотье — известен только как сотрудник Виолля.

19. Марсель Бриллюен (1854—1948) — выдающийся теоретик (работал в Париже), в особенности занимался явлениями упругости, трения и т. п.

20. Леконт Стивенс — американский ученый, работы по акустике и теории излучения.

21. Впоследствии П. Н. поручил А. Б. Млодзиевскому (тогда практиканту его лаборатории) разработать этот метод до степени точного физического эксперимента.

22. Август Витковский (1854—1913) — польский физик, работы преимущественно по свойствам газов.

23. Уилмер Дэфф — профессор (работал в Мадрасе и Ворчестере), работы по газам.

24. Н. П. Кастерин (1869—1948) — профессор, (работал в Одессе и Москве), работы по акустике, провел исследование оптики слоистых структур (липпмановская фотография).

25. Александер Пфлюгер — профессор (работал в Бонне), известен работами по поглощению и аномальной дисперсии света.

26. Горэс Ламб — профессор (работал в Манчестере), работы в разных областях теоретической физики и гидродинамики. Годфри — данных не имеется.

27. Эмиль Пикар — французский ученый, занимался механикой и математикой.

28. Ионатан Ценнек — физик, профессор (работал в Мюнхене), одно время был заведующим физической лабораторией Баденской содовой и анилиновой компании.

29. Конрад Цейсиг — профессор (работал в Дармштадте).

30. Отто Кригар-Менцель — профессор (работал в Берлине), провел работы по акустике, редактор «Собрания сочинений» Гельмгольца.

31. Альфред Корню (1841—1902) — профессор, академик (работал в Париже), выдающийся оптик («спираль Корню» и др.).

32. Виктор Гензен — врач и физиолог, профессор (работал в Киле), работы преимущественно по акустике.

33. Рихард Ваксмут — профессор (работал во Франкфурте-на-Майне), выполнил ряд работ по акустике, безэлектродному разряду и др.

34. М. Мараж — ряд работ по акустике напечатан во французских журналах.

35. Карл Зондгауз (1815—1886) — преподаватель средней школы, сделал большое число работ по акустике.

36. Альфредо Покеттино — профессор (работал в Турине), работы в самых разнообразных областях физики, в том числе и по акустике.

37. Лоран Шайк — преподаватель Военной академии в Бреда, работы по акустике и оптике.

28. Об измерении спокойствия и прозрачности атмосферы

Дополнение к ст. 25, как и статья 28, напечатаны в «Приложениях к протоколам» за 1906 (Приложение № 5. Рукопись — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 33).

29. Об особенностях спектра β Aurigue

Напечатана в «Известиях Академии наук», т. 24, стр. 93—95, 1906, и представляет собой доклад на заседании Физико-математического отделения. Появление статьи вызвано (как и последующих статей: 30, 31, 38) предположением о существовании дисперсии межзвездного пространства, которое высказали сначала А. А. Белопольский, а затем Г. А. Тихов и Ш. Нордман для объяснения ряда явлений, наблюдаемых в переменных звездах.

Многочисленные записи в дневниках и письмах свидетельствуют о большом интересе, который Лебедев проявлял к этому вопросу.

Подлинная рукопись (неполный черновик) — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 37.

1. А. А. Белопольский (1854—1929) — академик, один из первых русских астрофизиков. Важная физическая работа — экспериментальная проверка принципа Доплера — Физо (1900).

2. Фогель — см. прим. ред. 5, к ст. 3

3. Уильям Гемфрис — профессор (работал в Вашингтоне), выполнил многочисленные работы по астроспектроскопии и по влиянию давления на положение линий в спектре.

30. Кажущаяся дисперсия света в межзвездном пространстве

Напечатана (на французском языке) в «Comptes Rendus» Парижской Академии, т. 146, стр. 1254, 1907, представлена по просьбе П. Н. Анри Пуанкаре. На русском языке печатается здесь впервые. Подлинная рукопись — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 41.

См. прим. к ст. 29.

1. Шарль Нордман (—) — астроном Парижской обсерватории. В 1908 г. наблюдал различие экстремальных фаз яркости некоторых двойных звезд для разных частей спектра и объяснил его дисперсией межзвездного пространства; получил за эту работу премию Парижской Академии.

2. Г. А. Тихов (1875—1960) — астроном (работал в Пулкове), член-корреспондент Академии наук СССР. Выполнил довольно много работ по астрофизике, объяснял также указанное (прим. 1) различие фаз дисперсией небесного пространства.

3. Шварцшильд — см. прим. ред. 10 к ст. 22

31. Невозможность доказать существование измеримой дисперсии света в межзвездном пространстве по методу Нордмана — Тихова

Статья напечатана (на французском языке) в «Comptes Rendus» Парижской Академии, т. 147, стр. 515, 1908, представлена Анри Пуанкарэ. Подлинная рукопись — в Архиве АН СССР, 293, оп. 1, № 40. На русском языке печатается здесь впервые.

О содержании — см. прим. к ст. 29.

1. Нордман — см. прим. ред. 1 к ст. 30; Тихов — там же, прим. 2.

32. О давлении света на газы

Напечатано (на русском языке) в ЖРФХО, часть физ., т. 40, стр. 20—21, 1908, как доклад П. Н. Лебедева на I Менделеевском съезде, сделанный от его имени П.П. Лазаревым. Подлинной рукописи не существует.

1. Аррениус — см. прим. ред. 9; Фитцджеральд — 8; Шварцшильд — 10 к ст. 22.

33. О кажущейся дисперсии света в пространстве

Напечатана в т. 29, стр. 101—109, как заключительная статья Лебедева, посвященная этому вопросу. Подлинный текст (русский черновик) — в Архиве АН СССР, 293, оп. 1, № 42. На русском языке впервые напечатана в «собрании сочинений» 1913 г.,

в переводе учеников П. Н. Здесь дан тот же текст. Существует обмен писем с Фростом по поводу этой статьи.

1. Белопольский—см. прим. ред. 1 к ст. 29; Нордман и Тихов — 1 и 2 к ст. 30; Фогель — 5 к ст. 3.

2. Штейн Иоган — голландский астроном.

34. Фонометр

Напечатана впервые в ЖРФХО, часть физ., т. 41, стр. 263—264, 1909 г. Подлинная рукопись (на немецком языке) — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 44.

Статья возникла в связи с работой ученика П. Н. В. Д. Зернова; изготовленный фонометр был использован последним в дальнейшей работе.

1. В. Д. Зернов (1870 — 1936) — ученик П. Н., профессор (работал в Саратове и Москве), сделал работу по сравнению различных методов определения силы звука.

35. Световое давление

Популярная статья в «Физическом обозрении», т 11, стр 98—103, 1910. Подлинника не существует. Перепечатывается впервые.

1. Альтберг — см. прим. ред. 8 к ст. 26; Аррениус — 9 к ст. 22; Бартоли — 1 к ст. 2; Гулль — 7 к ст. 22; Никольс — 7 к ст. 18.

36. Опытное исследование давления света на газы

Эта классическая работа П. Н. Напечатана на русском (ЖРФХО, часть физ., т. 42, стр. 149—178, 1910), на немецком (Ann. d. Phys., т. 32, стр. 411—437, 1910) и на английском (Astrophys. Journ., т. 31, стр. 385—393, в сокращенном виде) языках. Подлинная рукопись (на немецком языке) — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 47 (сохранилось несколько вариантов рукописи).

1. Аррениус — см. прим. ред. 9 к ст. 22; Гулль — 7 к ст. 22; Никольс — 7 к ст. 18; Пойнтинг — 5 к ст. 26; Теплер — 18 к ст. 5; Фитцджеральд — 8 к ст. 22; Шварцшильд — 10 к ст. 22.

2. Иоганн Босша (1831—1911) — голландский ученый, непременный секретарь Нидерландской академии, выполнил ряд метрологических и измерительных работ («способ Босша»), известен как редактор («Собрание сочинений» Гюйгенса).

3. И. Х. Поггендорф (1796—1877) — немецкий физик, издатель широко известного в середине XIX в. физического журнала «Annalen der Physik».

37. Абсолютная величина давления солнечного света на земную атмосферу

Напечатано в ЖРФХО, часть физ., т. 42, стр. 349, 1910. Подлинной рукописи нет.

1. Ю. В. Вульф (1863—1925) — выдающийся кристаллограф (работал в Варшаве и в Москве). Занимался изучением роста кристаллов; установил «формулу Вульфа — Брэгга» для интерференции X-лучей в кристаллах.

2. Фитцджеральд — см. прим. ред. 8 к ст. 22.

38. Магнитометрическое исследование вращающихся тел

Работой по световому давлению на газы Лебедев завершил цикл своих «программных» исследований, посвященных пондеромоторным действиям волн, теперь он мог обратиться к другим крупным задачам. В их числе особо следует назвать явление Роуленда (действие конвекционных токов) — им он интересовался, судя по дневникам, еще с 16 лет — и установление природы земного магнетизма. Но первая задача была решена его другом А. А. Эйхенвальдом в 1908 г. Вторая составила предмет последнего (незаконченного) экспериментального исследования Лебедева.

Напечатана уже после ухода Лебедева из университета в ЖРФХО, часть физ., т. 45, стр. 484—498, 1911, и (на немецком языке) в «Annalen. der Physik», т. 39, стр. 840—849, 1912. Подлинная рукопись (на немецком языке) — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1 (черновик), №№ 53, 54; беловая — № 55; см. также №№ 58, 59.

1. Гэль Джордж (1868 —) — директор обсерватории на Моунт-Уилсон, астрофизик; П. Н. особо ценил его открытие о существовании магнитного поля на Солнце, сделанное на основании зеемановского смещения солнечных линий.

2. Зееман см. прим. ред. 25, Дюбуа — 22, Рубенс — 27 к ст. 4.

3. Уильям Сузерлэнд (1859 — 1912) — профессор (работал в Мельбурне), имел многочисленные теоретические работы, преимущественно по вопросам молекулярной физики.

4. А. И. Акулов талантливый механик, работавший с П. Н. в его лаборатории

39. Опытное исследования в области электромагнитных волн

Напечатана впервые во «Временнике» общества им. Леденцова, т. 2, стр. 17—20, 1911. Представляет собой обращение в это общество для получения субсидии па работы. Является, по сути дела, изложением программы работы лаборатории Лебедева в период перед его уходом из университета и после. Подлинная рукопись утрачена.

1. А. Р. Колли (1874—1918) — профессор (работал в Варшаве и Ростове-на-Дону), ученик П. Н., еще в период работы с затухающими волнами занимался дисперсией дециметровых волн.

2. П. П. Лазарев (1878—1941) — также ученик П. Н., врач, физик, академик, исследователь Курской аномалии, создатель советской школы биофизики, ранние работы — по фотохимии.

3. Нильс Финзен (1860—1904) — врач, занимавшийся разработкой новых методов светолечения.

4. X. С. Леденцов — богатый человек, оставивший свое огромное состояние на основание Общества для поощрения науки и изобретательства. В обществе большую роль играл Н. А. Умов, работал там и П. Н.

40. Русское общество и русские национальные лаборатории

Написана в 1911 г. после ухода Лебедева из университета. Напечатана в № 90 «Русских ведомостей», от 21 апреля 1911 г. Подлинная рукопись П. Н. не сохранилась.

41. Предельная величина коротких акустических волн

Как продолжение работы об ультраакустических волнах, сделанной Альтбергом по предложению П. Н., последний дал Н. П. Неклепаеву задачу обнаружить «мутность» газа для ультраакустических волн. К моменту ухода П. Н. из университета эта задача Н. П. Неклепаевым была закончена (см. ЖРФХО,часть физ., т. 43, стр. 101, 1911). Настоящая работа представляет собой теоретическое введение к ней, напечатана в ЖРФХО, часть физ., т. 43, стр. 108—110 и (на немецком языке) в «Annalen der Physik» за тот же год, т. 35, стр. 171—174. Подлинные рукописи П. Н. — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 57 (черновик).

1. Феликс Ауэрбах — профессор (работал в Иенес), выполнил ряд работ по акустике и молекулярной физике, написал много популярных статей.

2. Джемс Джинс (1877—1946) — профессор (работал в Кэмбридже), работы по термодинамике, кинетической теории газа, по астрофизике (внутреннее строение звезд с учетом светового давления и др.).

3. Джордж Тодд — профессор (работал в Ньюкэстле), работы по кинетической теории газов, подвижности ионов в газах и др.

4. Н. П. Неклепаев — рано скончавшийся ученик П. Н. Лебедева, выполнивший под его руководством работу о поглощении ультразвуков атмосферой.

42. Памяти первого русского ученого

Напечатана в газете «Русские ведомости», № 257, от 8 ноября 1911 г., по случаю 200-летия со дня рождения М. В. Ломоносова. Статья имеет явно автобиографическое значение в той части, где говорится о страданиях ученого, не имеющего лаборатории, о гибели «научных всходов» и т. д. Подлинная рукопись П. Н., с многочисленными изменениями, — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1.

1. Яков Штелин (1709—1785) — член Петербургской академии, специалист по гравюре, друг Ломоносова.

2. Христиан Вольф (1679—1754) — философ и физик, профессор, учитель Ломоносова (работал в Марбурге и Галле). Его «Вольфианскую физику», переведенную Ломоносовым, см. в I томе «Полного собрания сочинений Ломоносова», 1950.

3. Эту характеристику следует признать недооценкой тогдашней академии. Достаточно вспомнить, что в числе членов Академии одновременно были Эпинус, Эйлер, Рихман, несколько ранее — Даниил Бернулли.

4. Работами Н. М. Раскина и В. П. Барзаковского выяснено, что лабораторию М. В. Ломоносова никак нельзя назвать «маленькой» и «плохо оборудованной».

5. И. И. Шувалов (1727—1797) — государственный деятель, создатель, вместе с М. В. Ломоносовым, Московского университета.

6. И. И. Тауберт — советник канцелярии Петербургской Академии, враг идей и всех начинаний М. В. Ломоносова.

43. Спектрограф для ультракрасных лучей

Среди работ, не законченных П. Н. до ухода его из университета, была работа по постройке оригинального спектрографа для инфракрасных волн (работа К. П. Яковлева). Она не могла быть продолжена в новой лаборатории П. Н., и он описал прибор, в основных его чертах, в статьях на русском (ЖРФХО, часть физ., т. 43, стр. 125—130, 1911) и на немецком языках (т. 13, стр. 465—468, 1912). Подлинная рукопись П. Н. — в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 58 (на русском языке — неполный черновик) и 51 (на немецком языке, тоже неполный экземпляр).

1. Рубенс — см. прим. ред. 27 к ст. 4; Лэнглей — 2 к ст. 2.

2. К. П. Яковлев (1855) — профессор МГУ, ученик П. Н., работал над темой «Инфракрасная спектроскопия».

44. Успехи физики в 1911

Статья была напечатана в новогоднем номере «Русских ведомостей» за 1912 г. Последняя написанная П. Н. статья представляет собой обзор главнейших достижений физики в 1911 г. Любопытны его высказывания по поводу теории относительности. Подлинная рукопись не сохранилась.

1. В. Вин.— см. прим. ред. 2 к ст. 21; Рубенс — 27 к ст. 4; Физо — 4 к ст. 3.

2. Гейке Каммерлинг-Оннес (1853—1926) — профессор, директор Лейденской криогенной лаборатории, знаменит сжижением гелия (1908).

45. Давление света

Последняя работа Лебедева, вышедшая уже после его смерти в № 4 сборника «Новые идеи в физике», под редакцией И. И. Боргмана. Статья осталась незаконченной. Некоторые вставки сделаны П. П. Лазаревым, другие заимствованы из прежних работ П. П. Эти места оговорены в подстрочных примечаниях редакции.

Подлинная рукопись П. Н.— в Архиве АН СССР, ф. 293, оп. 1, № 56.

1. Николаус Гартзакер (1656—1725) — профессор, академик (работал в Утрехте, Берлине и Париже). Противник воззрений Ньютона, учитель Петра Великого в Амстердаме.

2. Вильгельм Гомберг (1652—1715) — путешественник, академик Парижской академии, физик и химик.

Остальные встречающиеся здесь имена — см. в примечаниях к ст. 18, 26 и 36.

СОДЕРЖАНИЕ

От редакции 9
1. Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссотти—Клаузиуса 11
2. Об отталкивательной силе лучеиспускающих тел 31
3. О движении звезд по спектроскопическим исследованиям 36
4. Август Кундт 49
5. Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы 68
6. Прибор для проложения звуковых колебаний 122
7. О двойном преломлении лучей электрической силы 127
8. Заметка о работе индукторов и камертонов от сетей постоянного тока . . 142
9. Об открытых Рентгеном X-лучах 144
10. П. Лейберг. Экспериментальное исследование коэффициента затухания акустических резонаторов 154
11. Экспериментальные работы А. Г. Столетова 157
12. Проложение с оборотной призмой 164
13. Жар вольтовой дуги 167
14. Способы получения высоких температур 168
15. Максвелло-бартолиевские силы давления лучистой энергии 178
16. Силы Максвелла-Бартоли, обусловленные давлением света 184
17. По поводу заметки проф. Д. А. Гольдгаммера 186
18. Опытное исследование светового давления 187
19. Исследование силы светового давления 211
20. Шкала электромагнитных волн в эфире 212
21. Термоэлементы в пустоте как прибор для измерения лучистой энергии 235
22. Физические причины, обусловливающие отступления от гравитационного закона Ньютона 240
23. Об одном видоизменении опыта Роуленда — Гильберта 246
24. Об измерении температуры солнечных пятен 249
25. Об измерения спокойствия и прозрачности атмосферы во время солнечных наблюдений 251

26. Силы светового давления 252
27. Успехи акустики за последние десять лет 259
28. Об измерении спокойствия и прозрачности атмосферы 272
29. Об особенностях спектра β Aurigae. 273
30. Кажущаяся дисперсия света в межзвездном пространстве. 276
31. Невозможность доказать существование измеримой дисперсии света в межзвездном пространстве по методу Нордмана — Тихова 278
32. О давлении света на газы 280
33. О кажущейся дисперсии света в пространстве 282
34. Фонометр 291
35. Световое давление 294
36. Опытное исследование давления света на газы 299
37. Абсолютная величина давления солнечного света на земную атмосферу . . 322
38. Магнитометрическое исследование вращающихся тел. Первое сообщение 323
39. Опытные исследования в области электромагнитных волн 335
40. Русское общество и русские национальные лаборатории. 339
41. Предельная величина коротких акустических волн. 347
42. Памяти первого русского ученого 350
43. Спектрограф для ультракрасных лучей. 359
44. Успехи физики в 1911 году 364
45. Давление света 368
Приложения
Т. П. Кравец. Петр Николаевич Лебедев 391
Н. А. Капцов. Роль Петра Николаевича Лебедева в создании научно-исследовательских кадров 406
Примечания редакции 413

Петр Николаевич Лебедев

Собрание сочинений

Утверждено к печати
Редколлегией серии «Классики науки»
Академии наук СССР

Редактор Издательства *В. Г. Беркгаут*
Технический редактор *Е. В. Макуни*

РИСО АН СССР № 1—4В. Сдано в набор 27/III 1963 г.
Подписано к печати 4/VII 1963 г. Формат 70×90 1/16.
Печ. л. 27 1/4 +2 вкл. Усл. печ. л. 31,88 Уч.-изд. л. 26,1 (25,9+0,2)
Тираж 2000 экз. Изд. № 1031
Тип. зак. № 2114

Цена 2 р. 3 к.

Издательтво Академии наук СССР.
Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография Издательства АН СССР.
Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

ОПЕЧАТКИ И ИСПРАВЛЕНИЯ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
229	8 св.	процесс	прогресс
314	16 св.	предложением	предположением
352	6 св.	могут	могу
385	10 св.	через эту	через S эту
414	15 св.	Бюрцбурге	Вюрцбурге
426	15 св.	обусловленные	обусловливающие
428	4 св.	автро	соавтор

П. Н. Лебедев. Собрание сочинений

П. Н.
ЛЕБЕДЕВ

ИЗБРАННЫЕ
ТРУДЫ





2 р. 03 к.